



La couleur : perception et reproduction

Yvon RENOTTE

U3A-Liège – 19 avril 2016



Université de Liège

Faculté des Sciences

Département AGO (Astrophysique, Géophysique et Océanographie)

Sart-Tilman, Bât.B5a, B-4000 Liège

Note préliminaire : Mode d'emploi

Le passage d'une dia à la suivante (transition) ou l'exécution d'une animation sont parfois automatiques

Il est donc conseillé d'attendre ± 5 secondes et si rien ne se passe, 'cliquer' pour effectuer l'action suivante (transition et/ou animation)

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Le même sujet a été présenté à l'Université Paul Pasteur – Strasbourg dans le cadre de «2015 Année Internationale de la Lumière»



« ICube en lumière »

La couleur, une question simple ?

Yvon RENOTTE

Strasbourg – 19 juin 2015



AIL 2015

année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière

Université de Liège

Faculté des Sciences

Département AGO (Astrophysique, Géophysique et Océanographie)

Sart-Tilman, Bât.B5a, B-4000 Liège

directeur: shabraken@ulg.ac.be / fondateur: y.renotte@ulg.ac.be – senior project manager / consultant
(tél. 04.366.3772 – fax. 04.366.8516)

<http://www.hololab.ulg.ac.be>



© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

La couleur, une question simple ?

Qu'est-ce que la couleur ?

Comment peut-on la manipuler ?

une question pas aussi simple qu'il ne paraît

Événement fondateur

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

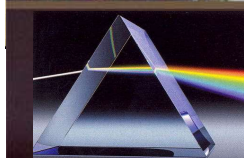
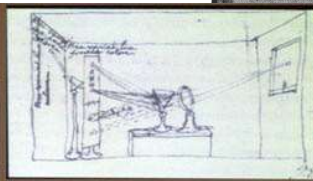
1704

Isaac Newton publie un traité d'Optique en Anglais

OPTICKS



Isaac Newton (1642-1727)



du Châtelet (1756)

*La lumière blanche est composée
de rayonnements dont la couleur va du violet au rouge foncé
→ décomposition spectrale de la lumière*

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Exemples de décomposition spectrale



naturelle
arc-en-ciel



artificielle
reflet sur un CD

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

La couleur, une question simple ?

Qu'est-ce que la couleur ?

une question pas aussi simple qu'il ne paraît

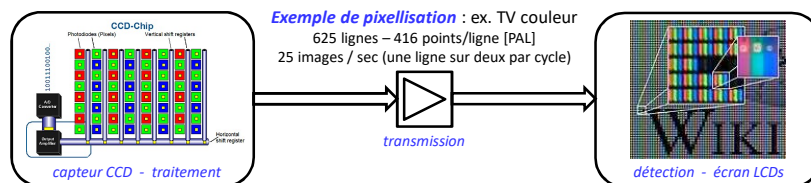
La couleur

Une des informations photo-visuelles perçues par l'œil

3 aspects

- géométrie (*optique géométrique*)
- distribution d'éclairement (*photo / radiométrie*)
- distribution de couleurs (*photo-colorimétrie*)

→ pixellisation

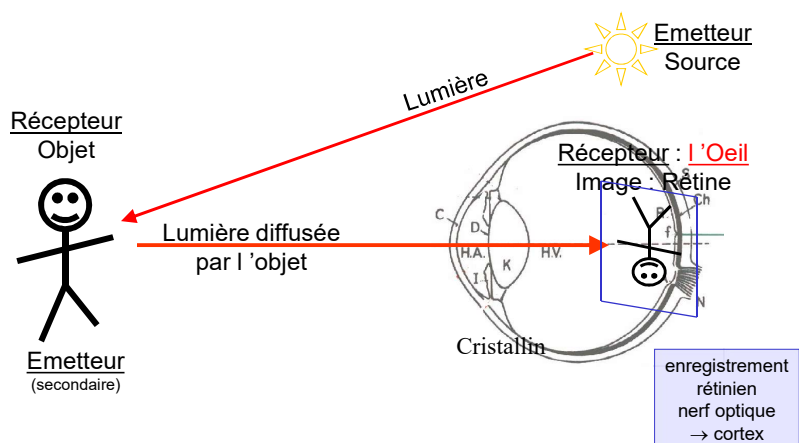


© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (25 janvier 2011)

Les systèmes optiques imageants

- exemple : l'œil → *Appareil de la vision*



© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

L'œil

L'œil est l'organe récepteur de l'appareil de la vision

Fonction: recevoir et transformer les vibrations électromagnétiques de la lumière / les photons en **influx nerveux** qui sont transmis au **cerveau**.

L'œil fonctionne comme un appareil photographique

Il a un volume d'environ $6,5 \text{ cm}^3$, il pèse 7 grammes.

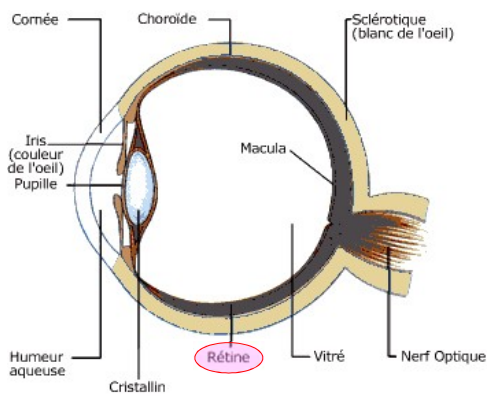
L'œil a la forme d'une sphère d'environ 24 mm de diamètre, complétée vers l'avant par une surface sphérique de 8 mm de rayon, la cornée.

La paroi du globe oculaire est formée de 3 tuniques :

- La tunique fibreuse
- La tunique uvéale
- La tunique nerveuse

© Yvon RENOTTE - ICube-Stresbourg (19 juin 2015)

L'œil



- | | |
|---|---|
| 1 - Pupille | 22 - Iris |
| 2 - Petit cercle artériel de l'iris | 23 - Conjonctive bulbaire |
| 3 - Angle irido-cornéen | 24 - Chambre postérieure |
| 4 - Artère radiaire | 25 - Zonule ciliaire |
| 5 - Grand cercle artériel de l'iris | 26 - Limbe cornéen |
| 6 - Sinus veineux de la sclère | 27 - Corps ciliaire |
| 7 - R. ciliaire postérieur | 28 - Muscle ciliaire |
| 8 - Conjonctive | 29 - Partie ciliaire de la rétine |
| 9 - Artère et veine ciliaires antérieures | 30 - Ora serrata |
| 10 - Artère ciliaire longue | 31 - Partie optique de la rétine |
| 11 - Artère ciliaire courte | 32 - Corps vitré |
| 12 - Muscle droit supérieur | 33 - Canal hyaloïdien |
| 13 - Artère épischlérale | 34 - Sclère |
| 14 - Veine vorticueuse | 35 - Choroïde |
| 15 - Fovéa centralis | 36 - Muscle droit inférieur |
| 16 - Artère ciliaire longue | 37 - Aire criblée de la sclère |
| 17 - Artère ciliaire courte | 38 - Artère et veine centrales de la rétine |
| 18 - Gaine externe | 39 - Neri optique |
| 19 - Cornée | 40 - Espace intervaginal |
| 20 - Chambre antérieure | 41 - Gaine interne |
| 21 - Cristallin | |

Bulbe de l'œil coupe sagittale et chanfreinée

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

L'œil : le globe oculaire

c'est l'organe récepteur de l'appareil de la vision

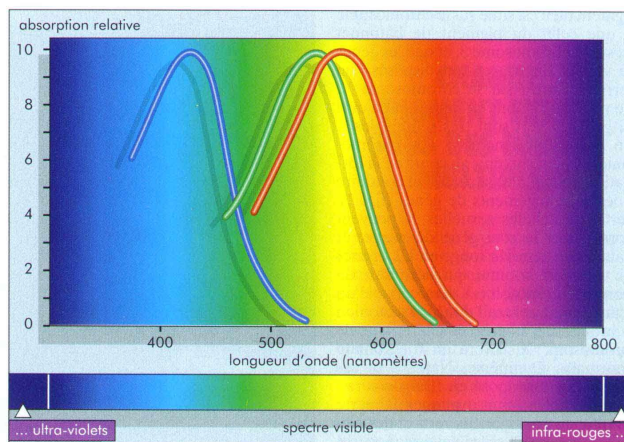
La rétine : couche **sensible** à la lumière grâce aux photorécepteurs : les **cônes** et les **bâtonnets**).

- **Les bâtonnets**
 - environ **130 millions**, absents de la fovéa et se logent **à la périphérie**
 - **très grande sensibilité à la lumière** → **vision nocturne (vision scotopique)**
 - très faible perception des détails et des couleurs
 - contiennent une substance chimique appelée **rhodopsine ou pourpre rétinien**
 - quand la lumière frappe une molécule de rhodopsine, celle-ci génère un faible courant électrique. Les signaux ainsi recueillis forment un message qui est transmis aux **cellules nerveuses de la rétine**
- **Les cônes**
 - environ **5 à 7 millions logés dans la fovéa**
 - **faible sensibilité à la lumière mais perception des détails très grande** → **vision diurne (vision photopique)**
 - **très bonne sensibilité aux couleurs**
 - **trois types selon le pigment qu'ils contiennent**
 - sensibilité à des ondes lumineuses de longueurs différentes
 - cônes contenant de l'**erythropsine** (sensibles au rouge)
 - de la **chloropsine** (sensibles au vert)
 - de la **cyanopsine** (sensibles au bleu)

L'existence de 3 types de cônes ≠ principe de la trivariance / trichromie

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Vision des couleurs chez l'homme trois types de cônes dans la rétine



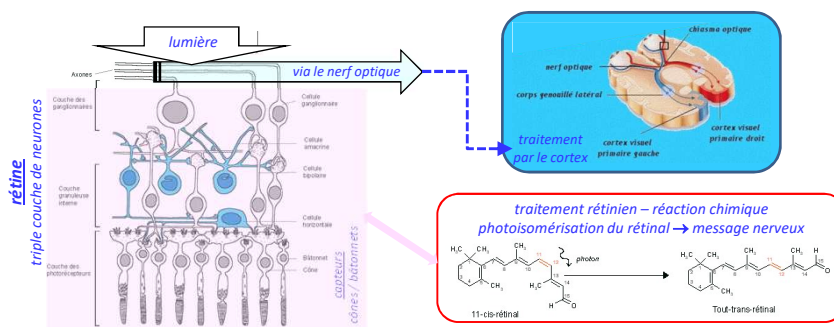
- Les cônes L, sensibles aux ondes longues (580 nm) → les **rouges**
- Les cônes M, sensibles aux ondes moyennes (545 nm) → les **verts**
- Les cônes S, sensibles aux ondes courtes (440 nm) → les **bleus**

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

La couleur, une question simple ?

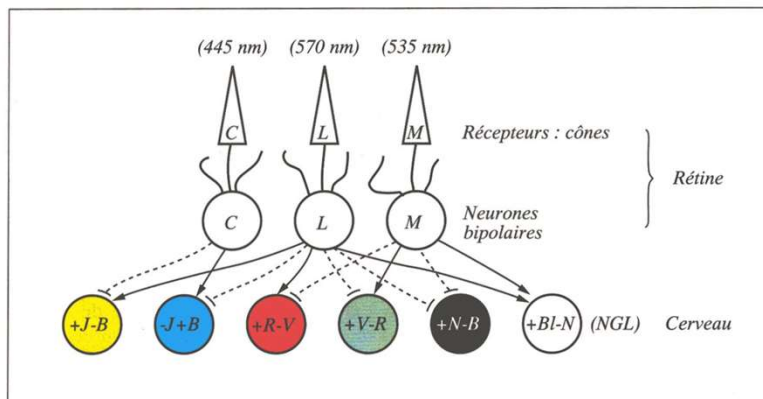
Qu'est-ce que la couleur ?

une question pas aussi simple qu'il ne paraît



© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Perception des Couleurs



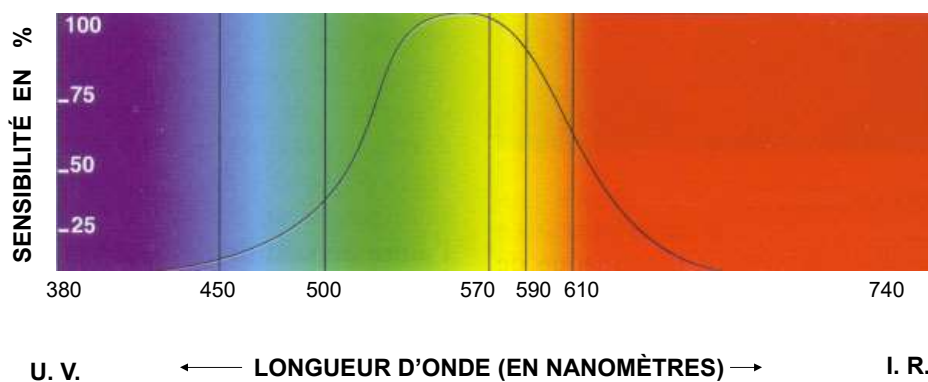
*Schéma de principe des connexions permettant la vision des couleurs jusqu'au niveau du noyau
grenouillé latéral (NGL) – cerveau –
À partir des récepteurs de lumière, l'information chemine par
4 canaux chromatiques et 2 canaux achromatiques*

© Yvon RENOTTE – HOLOLAB (29 avril 2016)

Bande passante de l'œil

Visibilité : $400 < \lambda < 750 \text{ nm}$

$\nu \sim 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$



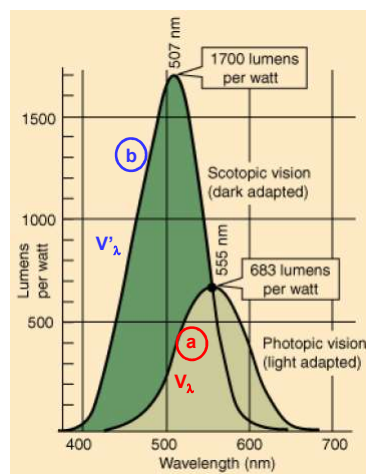
© Yvon RENOTTE – HOLOLAB (29 avril 2016)

Vision diurne / Vision nocturne

$$400 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm}$$

$$\nu \sim 6.10^{14} \text{ Hz}$$

flux	quasi-monochromatique	spectre large 400 → 700 nm
vision photopique	$\Phi_V = K V_\lambda \Phi_E$	$\Phi_V = K \int_{400}^{700} V_\lambda \frac{d\Phi_E}{d\lambda} d\lambda$
vision scotopique	$\Phi_V = K' V'_\lambda \Phi_E$	$\Phi_V = K' \int_{400}^{700} V'_\lambda \frac{d\Phi_E}{d\lambda} d\lambda$



Luminances visuelles relatives des couleurs spectrales

a) vision photopique : cônes, vision diurne colorée
b) vision scotopique : bâtonnets, vision nocturne non colorée

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

La couleur, une question simple ?

Qu'est-ce que la couleur ?

une question pas aussi simple qu'il ne paraît

La couleur

Une des informations photo-visuelles perçues par l'œil

3 aspects

- géométrique (*optique géométrique*)
- distribution d'éclairement (*photo / radiométrie*)
- distribution de couleurs (*photo-colorimétrie*)
- pixellisation
- réactions photo-chimiques dans la rétine
 - signaux nerveux transmis au cerveau via le nerf optique
 - traités par le cortex

⇒

La couleur n'est pas une grandeur physique

La couleur est une impression (illusion «d'optique»)

[Elle ne peut pas être représentée par un nombre pur suivi d'une unité]

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

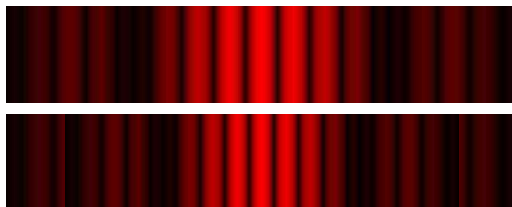
La couleur, une question simple ?

La couleur

souvent associée à la longueur d'onde λ [nm]

! λ dépend du milieu \rightarrow fréquence : ν [Hz] indépendante du milieu !

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(2\pi\nu + \varphi) \quad \lambda_0 = \frac{c}{\nu} = n\lambda$$



Interférences en 'lumière rouge' - $\lambda_0 = 632,82$ nm
haut: dans l'air - bas: dans l'eau

Rappel

lumière visible : $400 \leq \lambda \leq 700$ nm (10^{-9} m) $430 \leq \nu \leq 750$ THz (10^{12} Hz)

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

La couleur, une question simple ?

La couleur

souvent associée à la longueur d'onde λ [nm]

! λ dépend du milieu \rightarrow fréquence : ν [Hz] indépendante du milieu !

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(2\pi\nu + \varphi) \quad \lambda_0 = \frac{c}{\nu} = n\lambda$$

ok mais insuffisant pour reproduire toutes les subtilités (nuances, teintes,...) d'une information colorée

longueur d'onde (fréquence) du 'rose bonbon', du 'lilas' ?



© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

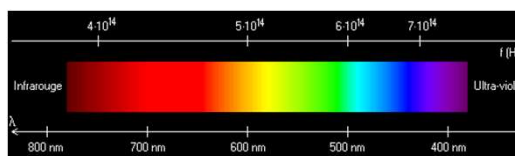
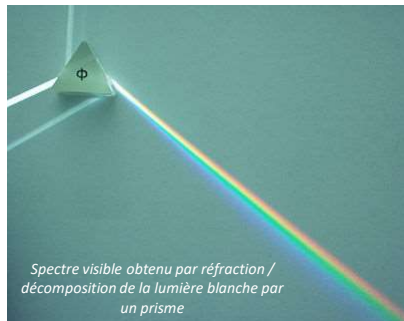
La couleur, une question simple ?

La couleur

souvent associée à la longueur d'onde λ [nm]

! λ dépend du milieu \rightarrow fréquence : ν [Hz] indépendante du milieu !

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(2\pi\nu + \varphi) \quad \lambda_0 = \frac{c}{\nu} = n\lambda$$



La fréquence (et λ_0) n'exprime(nt) qu'une partie de l'information 'couleur'
 \Rightarrow associée(s) aux **teintes saturées** (teintes spectrales)

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

La couleur n'est pas une grandeur physique

c'est une *sensation physiologique*

(construite par le cerveau à partir des informations fournies par les photo-capteurs rétiniens)

\rightarrow la multitude des teintes et de leurs nuances ne peut pas être représentée simplement par un, voire deux paramètres, tels

- la **fréquence** ν (ou plus communément la **longueur d'onde** $\lambda = c/\nu$ dans le vide, $\lambda = v/\nu = c/n\nu$ (n : indice de réfraction du matériau)
 [au mieux λ peut représenter les teintes saturées (spectrales) obtenues par décomposition de la lumière blanche]
- l'**éclairement** E (ou la **luminance** L)


\rightarrow **MAIS par le mélange d'au moins 3 couleurs** (chrominance + luminance)

«convenablement choisies» [mélange de 2 ne peut donner la 3^e]

- principe d'additivité
 - perçu par I. Newton
 - étudié au 19^e s
 - énoncé par J.C. Maxwell
- teintes complémentaires (ex: bleu et jaune et $b + j = \text{blanc}$)
- choix de 3 couleurs fondamentales
 - primaires: R – V – B
 - complémentaires: C – M – J

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

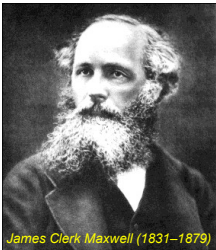
Pour en savoir plus sur les lois de Grassmann cliquer ➡




Isaac Newton (1642-1727)

Newton (1704) / Maxwell (1855)
la couleur n'est pas une grandeur physique
c'est une sensation physiologique

Young (1801) / Helmholtz (1859)
perception des couleurs par 3 types de récepteurs
rétiniens: 1 rouge, 1 vert, 1 bleu

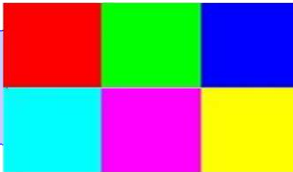



James Clerk Maxwell (1831-1879)



MakeAGIF.com

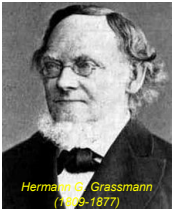
Principe de
Trichromie / Trivariance
3 paramètres pour représenter une
sensation colorée





Thomas Young (1773-1829)

Couleurs fondamentales
(trois : R-G-B / blanc / complémentaires : C-M-Y)
Lois d'association des couleurs
additivité : **Grassmann (1853)**



Hermann Grassmann (1809-1877)

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Systèmes colorimétriques - principe -

E_W : éclairage rouge + vert + bleu

C_{W-haut}

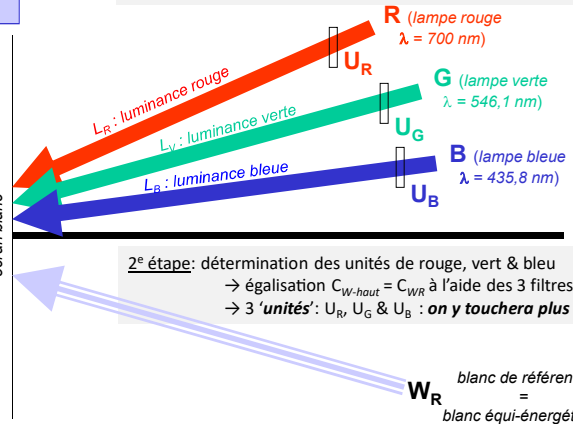
C_{WR}

E_{WR} : égalisation des éclairages

↓

Égalisations chromatique et en éclairement

1^{re} étape: détermination des unités de rouge, vert & bleu
→ 3 sources: R, G & B + 3 filtres



2^e étape: détermination des unités de rouge, vert & bleu
→ égalisation $C_{W-haut} = C_{WR}$ à l'aide des 3 filtres
→ 3 'unités': U_R, U_G & U_B : **on y touchera plus**

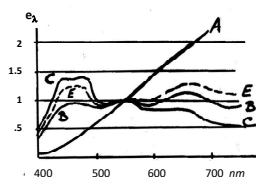
W_R blanc de référence = blanc équi-énergétique

Principe(s) de base

- **Additivité** des [couleurs] (une teinte t + une luminance L): $C_1(t, L_1) + C_2(t, L_2) + \dots = C(t, L)$
- **Trichromie**: on peut reconstituer (*presque*) toute plage colorée $C_i(t, L_i)$ en 'mélangeant' 3 [couleurs] de base 'convenablement choisies' (le mélange de 2 ne peut pas donner la 3^e):
par ex. R, G et B → $C_i(t, L_i) = C_1(\lambda_R, L_R) + C_2(\lambda_G, L_G) + C_3(\lambda_B, L_B)$

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Colorimétrie / Etalon Blanc



Choix du blanc étalon

- étalon **A** : lampe à incandescence à filament de tungstène: $T = 2850\text{ K}$
- étalons **B & C** : simulent la lumière du jour: $T = 4800 \text{ \& } 6500\text{ K}$
- étalon **E** : même principe

Lumière W (théorique) à spectre d'égale énergie = **blanc équi-énergétique**

La répartition énergétique spectrale serait constante en fonction de λ
 → approximation « E »

- **Teinte (λ_d) – Saturation (pureté p) – Luminance** => **cas des pourpres excepté**
- L : luminance [cd/m^2] d'un faisceau coloré quelconque et $L = L_W + L_d$ L_W = luminance d'un **faisceau blanc** superposé à L_d = luminance d'un **faisceau monochromatique** de longueur d'onde λ_d (**longueur d'onde dominante**)
 λ_d indique la **teinte** W : **lumière blanche** telle que définie ci-dessus
- **Facteur de pureté**: $p = L_d/L = L - L_W/L \rightarrow p = 1$: la **couleur est saturée** / p diminue quand la proportion de blanc W augmente → on dit que la couleur est lavée de blanc
- λ_d , p et L : caractérisent complètement l'aspect coloré d'un faisceau de luminance L : c'est une manière d'exprimer la **trichromie**: λ_d (teinte) et p (pureté) = **2 coefficients** exprimant la **chromaticité**, L est un **coefficient** essentiellement **photométrique**
- On peut également exprimer la **trichromie** comme la **somme de 3 luminances**: une rouge L_R , une verte L_G et une bleue L_B - cet approche est développée séparément
 → **3 paramètres sont nécessaires et suffisants pour définir la couleur d'une lumière**
- **Couleurs complémentaires**
 Deux lumières sont complémentaires quand agissant simultanément et en proportions convenables, elles donnent à l'œil l'impression d'une lumière blanche
 - ex. : 435 nm (bleu) et 590 nm (jaune)
 - !! **pour les verts de $\lambda \in [435,8 - 546,1\text{ nm}]$ → les complémentaires sont des pourpres !!**

© Yvon RENOTTE - U3A (26 janvier 2018)

Systèmes colorimétriques - principe -

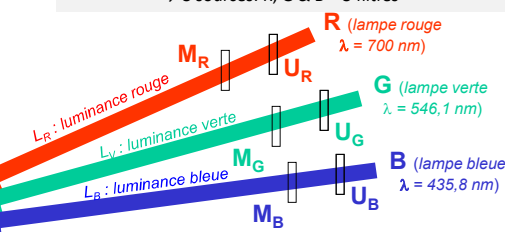
E_W : éclairage rouge + vert + bleu



E_{W-R} : égalisation des éclairages

↓
Égalisations chromatique et en éclairement

1^{re} étape: détermination des unités de rouge, vert & bleu
 → 3 sources: R, G & B + 3 filtres



2^e étape: détermination des unités de rouge, vert & bleu
 → égalisation $C_{W-haut} = C_{WR}$ à l'aide des 3 filtres
 → 3 '**unités**': U_R , U_G et U_B : **on y touchera plus**

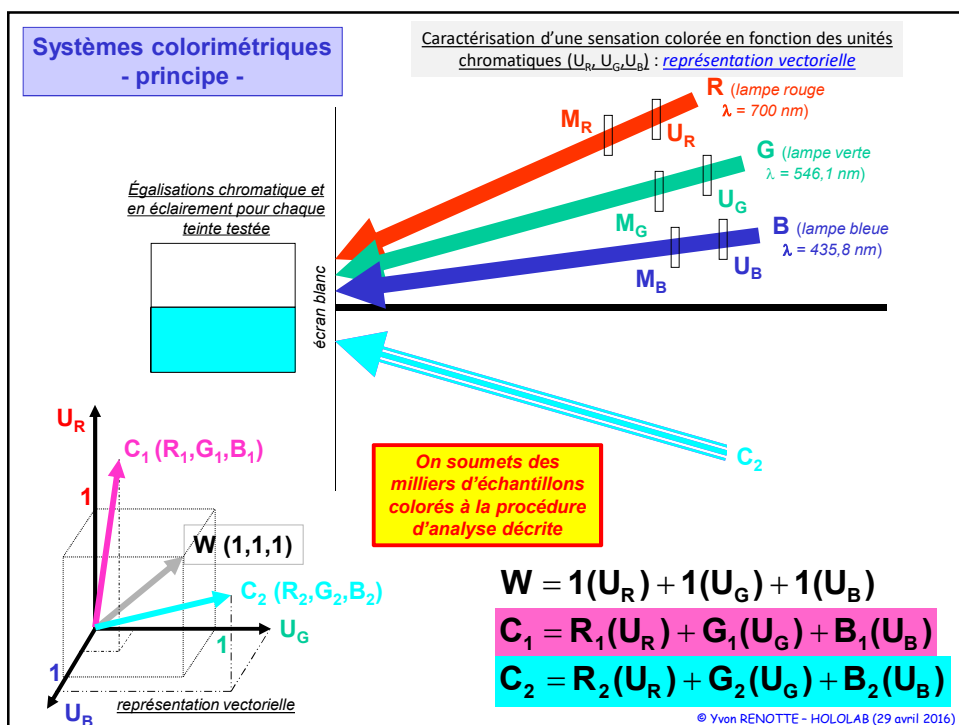
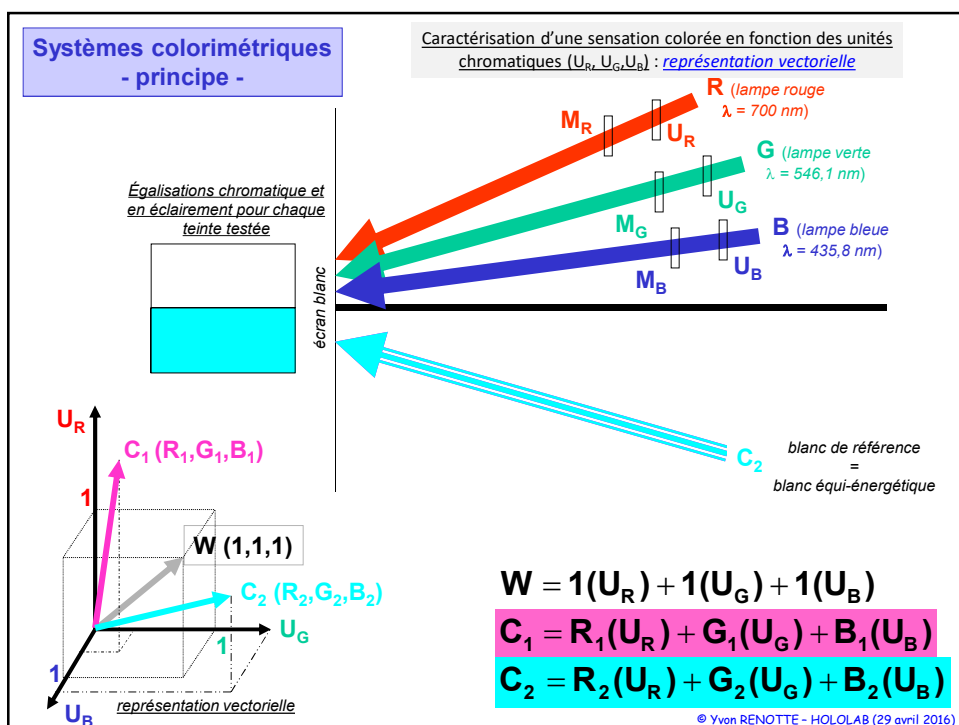
3^e étape: ajout de 3 filtres M_i → détermination des quantités de R, G & B dans une plage colorée inconnue
 → égalisation $C_{haut} = C_{bas}$ à l'aide des 3 filtres M_i

W_R blanc de référence = blanc équi-énergétique

Principe(s) de base

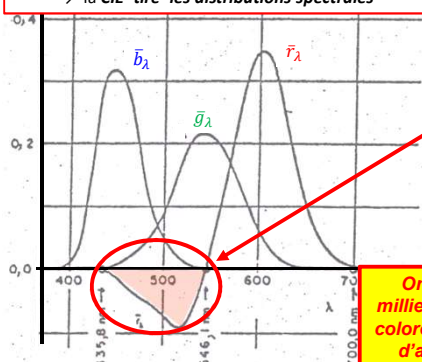
- **Additivité** des [couleurs] (une teinte t + une luminance L): $C_1(t, L_1) + C_2(t, L_2) + \dots = C(t, L)$
- **Trichromie**: on peut reconstituer (**presque**) toute plage colorée $C_i(t, L_i)$ en 'mélangeant' 3 [couleurs] de base 'convenablement choisies' (le mélange de 2 ne peut pas donner la 3^e):
 par ex. R, G et B → $C_i(t, L_i) = C_1(\lambda_R, L_R) + C_2(\lambda_G, L_G) + C_3(\lambda_B, L_B)$

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (25 janvier 2018)



Composants trichromatiques R, G, B Coefficients trichromatiques r, g, b

1931: examen de milliers d'échantillons colorés par des milliers d'individus indépendants
→ la CIE 'tire' les distributions spectrales



Composante trichromatiques R, G, B des couleurs spectrales

Problème

Il existe des couleurs qui ne sont identiques à aucune composition des 3 couleurs de base
C'est le cas des verts spectraux voisins de 500 nm
 $435,8 \leq \lambda \leq 546,1$ nm

On résout le problème en additionnant de rouge cette couleur X ce qui donne une composition $X + (R, 0, 0)$ qui peut être égalée à un mélange de vert et de bleu

On dit que ce vert a pour composante trichromatique $X = (-R, G, B)$

L'écriture $-R$ signifiant que le rouge est ajouté à la teinte étudiée dans la plage supérieure des figures précédente

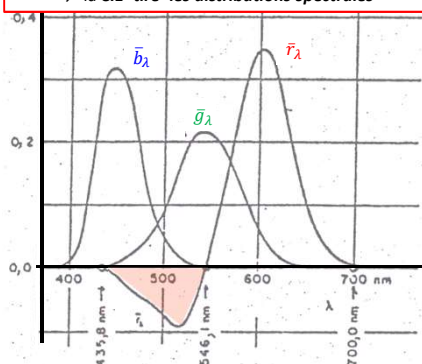
Les couleurs bleu et vert éclairent la seule plage inférieure

On soumet
milliers d'échantillons
colorés à la
d'analyse

© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

Composants trichromatiques R, G, B Coefficients trichromatiques r, g, b

1931: examen de milliers d'échantillons colorés par des milliers d'individus indépendants
→ la CIE 'tire' les distributions spectrales



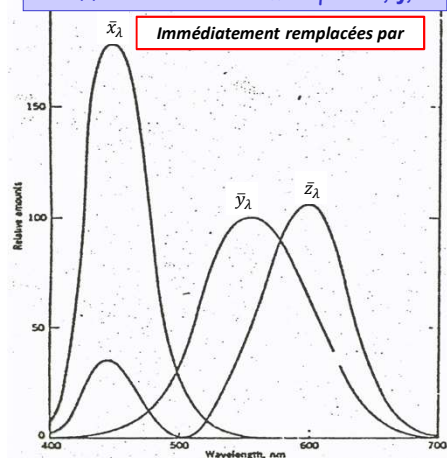
Composante trichromatiques R, G, B des couleurs spectrales

Avantages:

- le blanc W reste caractérisé par l'égalité des composantes trichromatiques
- la composante Y n'est pas autre chose que la composante visuelle
- les composantes trichromatiques sont toujours positives
- la 3^e composante \bar{z}_λ est rigoureusement nulle pour $\lambda \geq 630$ nm

Composants trichromatiques X, Y, Z Coefficients trichromatiques x, y, z

Immédiatement remplacées par



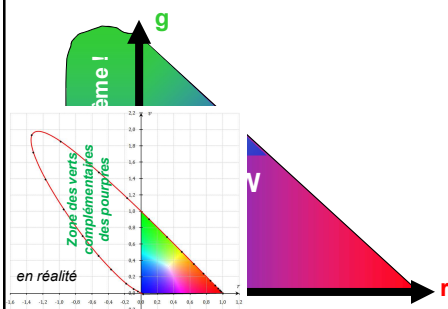
Composante trichromatiques des couleurs spectrales
Système X, Y, Z

Normalisation : $\bar{y}_{max} = 100$

$$\begin{aligned} X &= 2,7689 R + 1,7519 G + 1,1302 B \\ Y &= R + 4,5909 G + 0,06012 B \\ Z &= 0,0565 G + 5,5944 B \end{aligned}$$

© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

Systèmes colorimétriques RGB et XYZ (CIE - 1931)



$$r = \frac{R}{R+G+B}$$

$$g = \frac{G}{R+G+B}$$

$$b = \frac{B}{R+G+B}$$

$$W = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)$$

blanc équi-énergétique

$$r + g + b = 1$$

R, G, B : composantes
r, g, b : coefficients
trichromatiques

C.I.E. (1931)

- Luminances de base

- L_R : luminance d'une radiation rouge: $\lambda = 700$ nm
- L_G : luminance d'une radiation verte: $\lambda = 546,1$ nm (raie verte du Hg)
- L_B : luminance d'une radiation bleue: $\lambda = 435,8$ nm (raie bleue du Hg)

- Système R, G, B : composantes trichromatiques

$$R = L_R \quad G = L_G/4,5907 \quad B = L_B/0,06012$$

$$R = G = B : \text{blanc équi-énergétique}$$

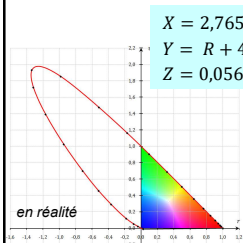
$$\rightarrow B \text{ et } G > 0 ; R < 0 \text{ pour } 435,8 < \lambda < 546,1 \text{ nm}, R > 0 \text{ pour } \lambda > 546,1 \text{ nm}$$

- Coefficients trichromatiques

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad r + g + b = 1$$

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Systèmes colorimétriques RGB et XYZ (CIE - 1931)



$$X = 2,7659 R + 1,7519 G + 1,1302 B$$

$$Y = R + 4,5907 G + 0,06012 B$$

$$Z = 0,0565 G + 5,5944 B$$

$$r = \frac{R}{R+G+B}$$

$$g = \frac{G}{R+G+B}$$

$$b = \frac{B}{R+G+B}$$

$$W = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)$$

blanc équi-énergétique

$$r + g + b = 1$$

R, G, B : composantes
r, g, b : coefficients
trichromatiques

Diagrammes de chrominance

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

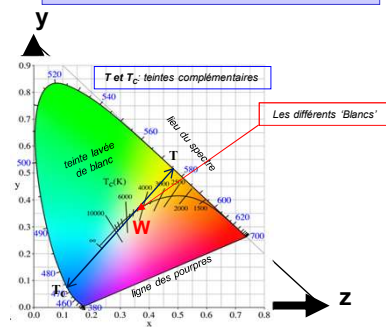
$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$$x + y + z = 1$$

X, Y, Z : composantes
x, y, z : coefficients
trichromatiques

↓
coordonnées
trichromatiques
normalisées



© Yvon RENOTTE - ICube-Stresbourg (19 juin 2015)

C.I.E. (1931)

- Luminances de base

- L_R : luminance d'une radiation rouge: $\lambda = 700$ nm
- L_G : luminance d'une radiation verte: $\lambda = 546,1$ nm (raie verte du Hg)
- L_B : luminance d'une radiation bleue: $\lambda = 435,8$ nm (raie bleue du Hg)

- Système R, G, B : composantes trichromatiques

- $R = L_R$ $G = L_G/4,5907$ $B = L_B/0,06012$
- $R = G = B$: blanc équi-énergétique
 $\rightarrow B$ et $G > 0$; $R < 0$ pour $435,8 < \lambda < 546,1$ nm, $R > 0$ pour $\lambda > 546,1$ nm

- Coefficients trichromatiques

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad r + g + b = 1$$

- Système X, Y, Z : coordonnées trichromatiques

$$X = 2,7689 R + 1,7518 G + 1,1302 B \quad Y = R + 4,5907 G + 0,06012 B$$

$$Z = 0,05651 G + 5,59429 B$$

- $X = Y = Z$: blanc équi-énergétique et $Y = L_R + L_G + L_B$ = luminance de la scène
- X, Y et $Z > 0$

- Coefficients trichromatiques

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad x + y + z = 1$$

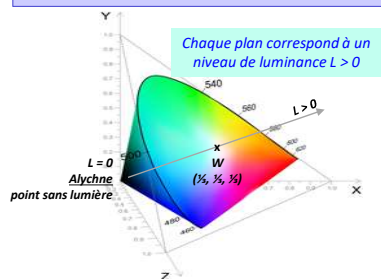
© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Coordonnées chromatiques

x, y, z (1931)

u, v, Y (1960)

u', v', Y (1976)



impression (aspect photo-colorimétrique)

2 paramètres chromatiques
(x, y / u, v / u', v')
1 paramètre photométrique
(luminance L)

À partir des valeurs du tristimulus X, Y, Z

CIE (Commission Internationale de l'Éclairage)

1931 : système R, G, B $\rightarrow r, g, b$

1931 : système 'normalisé' X, Y, Z $\rightarrow x, y, z$

$$x = X/(X+Y+Z) \quad y = Y/(X+Y+Z) \quad z = 1 - (x+y)$$

1960 : système corrigé : u, v, Y

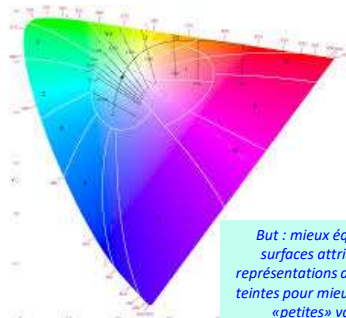
$$u = 4X/(X+15Y+3Z) = 4x/(-2x+12y+3)$$

$$v = 6Y/(X+15Y+3Z) = 6y/(-2x+12y+3)$$

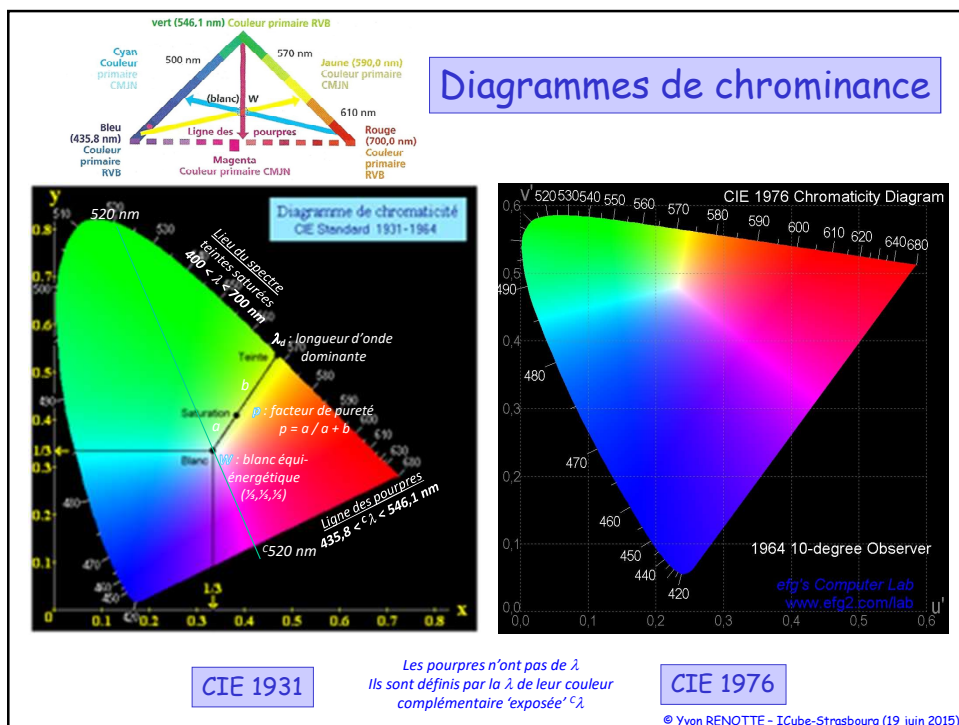
1976 : système 'recorrigé' : u', v', Y

$$u' = 4X/(X+15Y+3Z) = 4x/(-2x+12y+3)$$


$$v' = 9Y/(X+15Y+3Z) = 9y/(-2x+12y+3)$$



© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)



À propos du 'Noir' et du point alychne



Erwin Schrödinger
(1887-1961)
Prix Nobel de
Physique 1933

Ce que l'on sait rarement ...

... **Erwin Schrödinger** apporta une part importante dans les concepts théoriques qui faisaient défaut à cette époque. Il démontre que si l'espace RGB est représenté par un cube, il existe à l'extérieur de ce cube, un plan où la luminance est nulle: **l'alychne** (travaux publiés entre 1920 et 1927).

Cette notion permettra à la CIE de développer un système harmonieux de représentation des couleurs.


"Black is black" chantait le groupe de pop-rock Los Bravos en 1966.

Pourtant certains noirs le sont plus que d'autres selon la quantité de lumière qu'ils absorbent et qu'ils réfléchissent.

Si le noir absolu n'existe pas, il y en est un qui s'en approche fortement: le **Vantablack™**, un matériau réputé pour être le plus noir au monde car il absorbe **99,96%** de la lumière.

Le **Vantablack™** est une matière nouvelle faite de nanotubes de carbone agencés verticalement, serrés les uns contre les autres.

Il a été mis au point en 2012 par **Surrey Nanosystems** (GB).



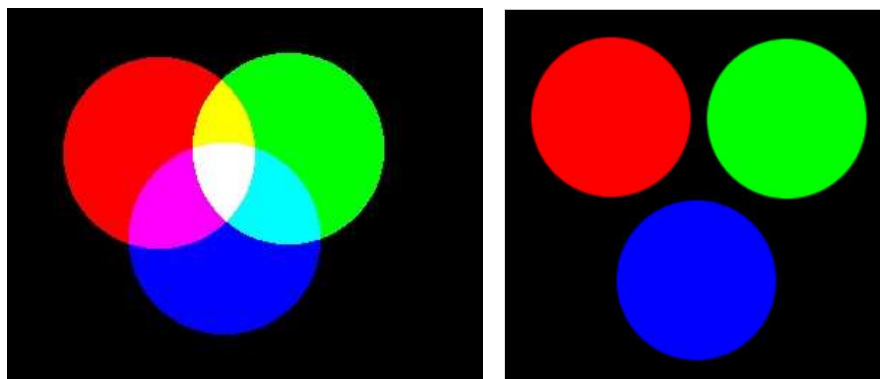
Feuille d'aluminium froissée couverte de Vantablack™ : les plis ne sont plus perceptibles.

© Yvon RENOTTE - U3A (28 janvier 2018)

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Synthèses Additive - Soustractive

La synthèse additive :
on superpose des faisceaux de lumières colorées.

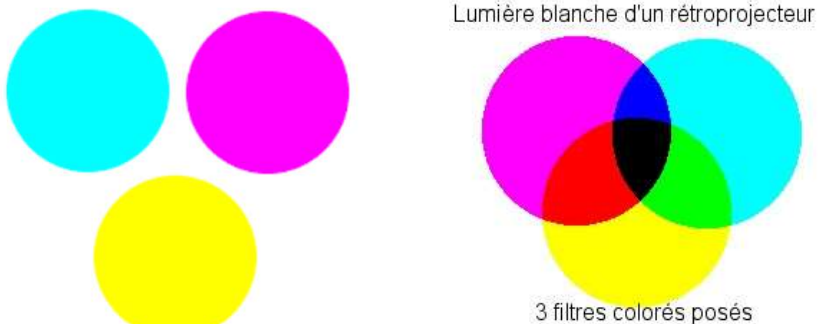


lumière rouge + lumière verte = lumière jaune
lumière rouge + lumière bleue = lumière magenta
lumière bleue + lumière verte = lumière cyan
lumière bleue + lumière verte + lumière rouge = lumière blanche

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

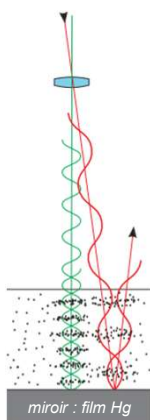
Synthèses Additive - Soustractive

La synthèse soustractive : on superpose des filtres colorés.
La lumière blanche passe à travers cette superposition de filtres.



filtre jaune + filtre magenta = lumière rouge transmise
filtre jaune + filtre cyan = lumière verte transmise
filtre magenta + filtre cyan = lumière bleue transmise
filtre cyan + filtre magenta + filtre jaune = pas de lumière transmise

Synthèse additive : exemple



miroir : film Hg

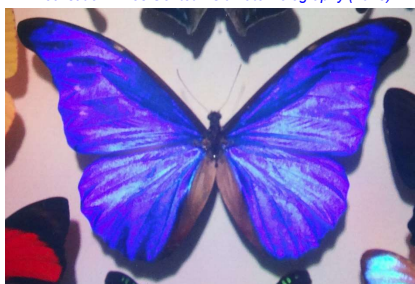


Photographie interférométrique
de Lippmann (1891)

Gabriel Lippmann (1845-1921)

Hologramme de réflexion en couleurs type Denisyuk (1963)

réalisation: Yves Gentet – Ultimate Holography (2013)



Hans Bjelkhagen – Hansholo
Consulting Ltd (Whales, UK)



Yuri Denisyuk
(1927-2006)

© Yvon RENOTTE – HOLOLAB (29 avril 2016)

Synthèse soustractive : exemple



Reproduction des couleurs dans l'imprimerie

© Yvon RENOTTE – HOLOLAB (29 avril 2016)

Pour - en savoir plus sur la synthèse soustractive cliquer →

Exemple de quadrichromie

Photo de référence (un étalage de fruits)

Séparation quadrichromique : de gauche à droite :

couche cyan,
couche magenta,
couche jaune
et
couche noire



cy + ma + ja + b/n



cyan + magenta
cyan + jaune
magenta + jaune
cy + ma + ja

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

La couleur, une question simple ?

Plan de la présentation

Considérations préliminaires

Remarques

- pas de rappels relatifs à la lumière et ses propriétés supposés connues
- pas un cours d'optique physiologique

Appareil de la vision

- Les systèmes photoniques
- L'œil humain
 - pas de considérations
 - des autres formes de visions, multiples et variées
 - des maladies et défauts de fonctionnement de l'œil, et du système physio-visuel

Origine des couleurs

- Influence de la source
- Interactions lumière – matière et lumière - lumière

Codage(s) des couleurs

- Trichromie – paramétrisation
- Systèmes – diagrammes de chrominance

Reproduction

- Synthèses additive et soustractives
- Exemples

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Rôle de l'éclairage

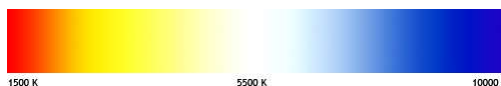
- composition spectrale de la source
- ex. de spectres émis par différentes sources:
 - *thermique / incandescente* → spectres continus
ex.: bougie, flamme, ampoule incandescente, ...
 - *luminescente* → spectres non-continus: raies, bandes, ...
ex.: TL (lampe Hg + luminescence), lampes spectrales (éclairage Na, Hg, ...), LASERs (monochromatique), LEDs (plusieurs bandes)

Température de couleur

Tous les objets (minéraux ou métaux) que l'on chauffe jusqu'à une très haute température commencent par émettre des rayons infrarouges, puis émettent une lumière rouge progressivement orangée, jaune, blanche et enfin bleutée. *Le corps noir* (un corps non coloré par des lumières extérieures) sera l'échantillon parfait pour cette expérience : cf. spectres d'émission

La température de couleur T_c = la température exprimée en **K (Kelvin)** pour laquelle le radiateur intégral (corps noir) émettrait un rayonnement de même composition spectrale que celle émise par le radiateur réel considéré
Cette comparaison suggérée par Lord Kelvin permet de caractériser les variations de la lumière du jour (ciel et soleil) aux différentes heures de la journée. Elle a été étendue aux divers éclairages colorés.

- ambiance 'chaude'
- ambiance 'naturelle'
- ambiance 'froide'

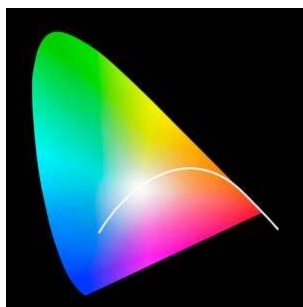


© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Tous les objets (minéraux ou métaux) que l'on chauffe jusqu'à, une très haute température commencent par émettre des rayons infrarouges, puis émettent une lumière rouge, puis progressivement orangée, jaune, blanche et enfin bleutée.

Le corps noir (un corps non coloré par des lumières extérieures) sera l'échantillon parfait pour cette expérience. On fait correspondre la courbe de température obtenue avec les variations de teinte.

La température de couleur est donc l'indice de neutralité du blanc.

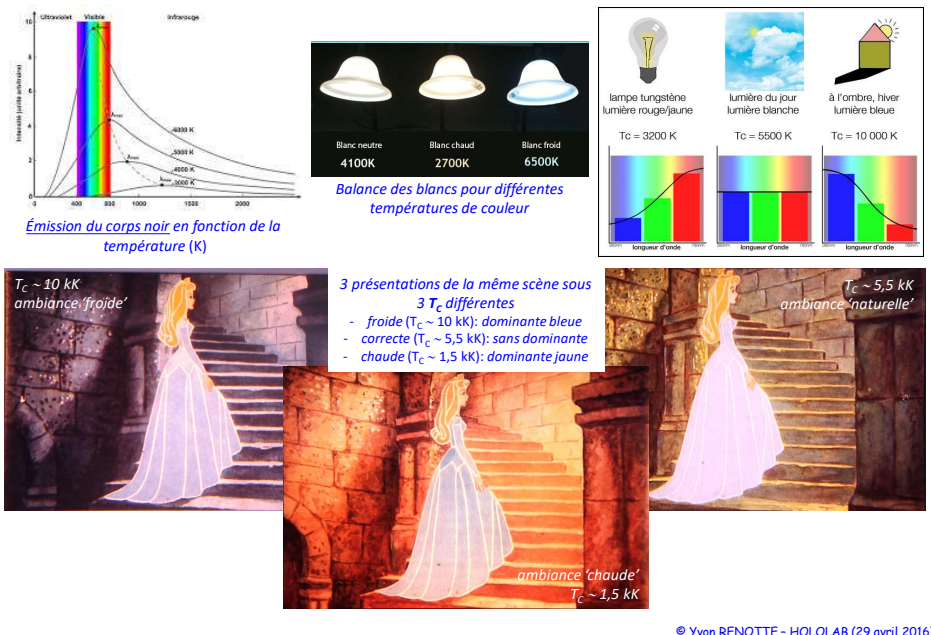


William Thomson
Lord Kelvin
(1824-1907)

C'est **Lord Kelvin** qui a eu l'idée de comparer les variations de couleur de la lumière du jour avec celles d'un corps non coloré que l'on chauffe à haute température et qui passe successivement du rouge, au jaune, au blanc et enfin au bleu. Il a pu ainsi trouver une comparaison pour caractériser les lumières du ciel et du soleil aux différentes heures de la journée et c'est pour cette raison que l'on parle de température de la couleur pour qualifier en « degré » Kelvin, la dominante plus ou moins bleue ou jaune d'une source lumineuse

© Yvon RENOTTE - ICube-Stresbourg (19 juin 2015)

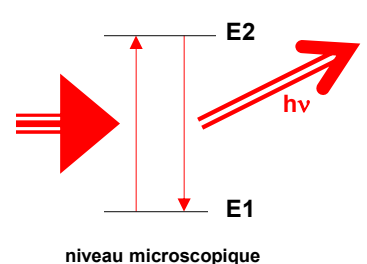
Utilisation de la température de couleur



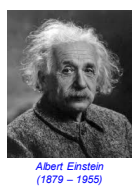
Les interactions rayonnement - matière

d'où vient la couleur ?

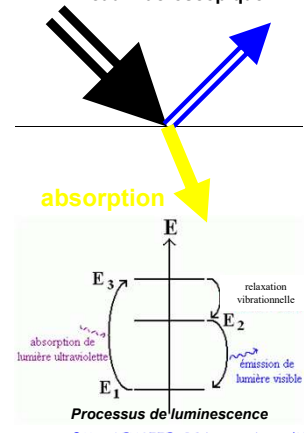
• Absorption – Emission



• Absorption – Emission spontanée
• Durée de vie de l'état excité E_2 : $\sim 10^{-8}$ s

$$E_2 - E_1 = h\nu$$


• Absorption - Diffusion
⇒ méthode soustractive
niveau macroscopique

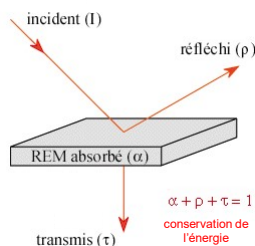


© Yvon RENOTTE - ICube-Stresbourg (19 juin 2015)

Les interactions rayonnement - matière

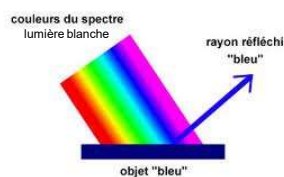
Rayonnement électromagnétique atteint un objet →

- certaines longueurs d'onde sont absorbées : α = coefficient d'absorption (part d'énergie absorbée)
 - d'autres sont réfléchies par l'objet : ρ = coefficient de réflexion (part d'énergie réfléchie)
 - une partie du rayonnement peut être transmise si l'objet est plus ou moins transparent, avec un changement de direction de la propagation dû à la réfraction : τ = coefficient de transmission (part d'énergie transmise)
- la partie du rayonnement absorbée modifie l'énergie interne de l'objet et produit de la chaleur qui sera réémise sous forme d'un rayonnement à une plus grande longueur d'onde
 - corps totalement opaque : pas de rayonnement transmis → $\tau = 0$, $\alpha + \rho = 1$
 - corps parfaitement transparent : pas de rayonnement réfléchi → $\rho = 0$, $\alpha + \tau = 1$



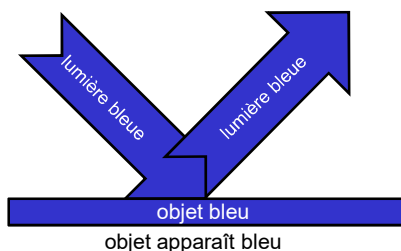
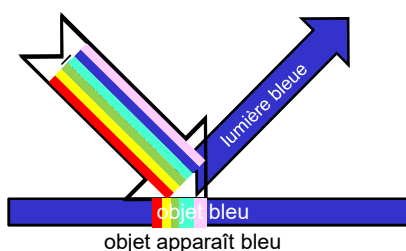
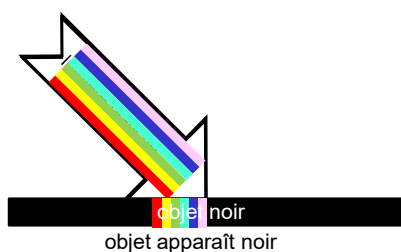
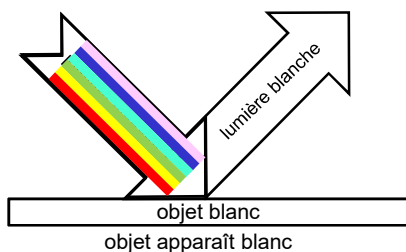
⇒ à la longueur d'onde λ : $\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$

- α_λ : coefficient d'absorption
- ρ_λ : coefficient de réflexion
- τ_λ : coefficient de transmission

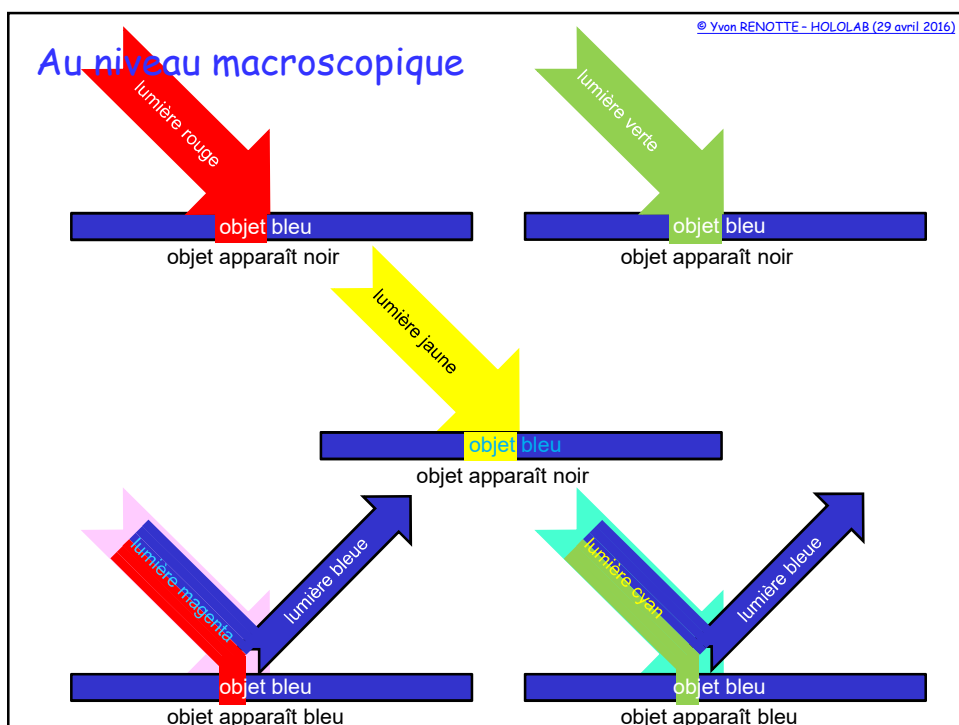


© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

Au niveau macroscopique



© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)



Les Couleurs

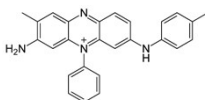
d'où vient la couleur ? *Interactions lumière – matière et lumière – lumière*

- **absorption** (pigments, luminescence, ...) ⇒ méthode soustractive
- **interférence, diffraction, diffusion**, ... (*irisation*) ⇒ méthode additive



Michel-Eugène Chevreul
(1786-1889)

Au début du XIXe siècle, les chimistes, notamment en France, travaillent activement sur les colorants et s'efforcent d'isoler et d'identifier les principes actifs colorants des plantes tinctoriales, ouvrant la voie à la production industrielle de colorants synthétiques



En 1856, le jeune Anglais William Henry Perkin invente le tout premier colorant de synthèse: la **mauveine** $C_{26}H_{23}ClN_4$ [acétate de 3-amino-2,±9-diméthyl-5-phényl-7-(p-tolylamino)phénazinium]



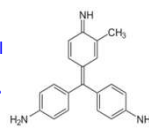
William H. Perkin
(1838-1907)



François-Emmanuel Verguin
(1814-64)

En 1858, ce sera ensuite au tour du Français François Emmanuel Verguin d'inventer la **fuchsine** $C_{20}H_{20}N_3 \cdot HCl$ extraite de l'aniline

Dès lors, les découvertes vont se succéder à un rythme rapide



Paire de bottines, vers 1880, France

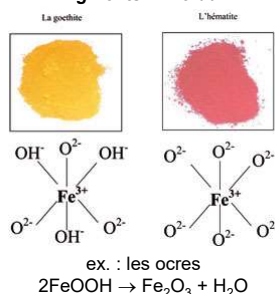
© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (27 janvier 2018)

Les Couleurs

d'où vient la couleur ? *Interactions lumière – matière et lumière – lumière*

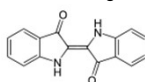
- **absorption** (pigments, luminescence, ...) ⇒ méthode soustractive
- **interférence, diffraction, diffusion, ... (irisation)** ⇒ méthode additive

Pigments minéraux

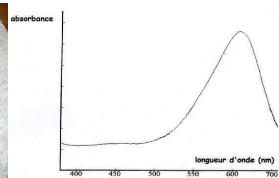


Pigments organiques

ex. : l'indigo



Jean coloré à l'indigotine



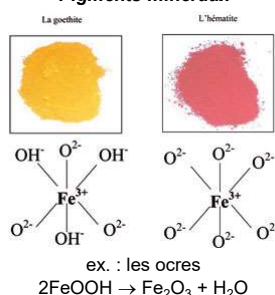
© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Les Couleurs

d'où vient la couleur ? *Interactions lumière – matière et lumière – lumière*

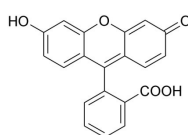
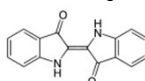
- **absorption** (pigments, luminescence, ...) ⇒ méthode soustractive
- **interférence, diffraction, diffusion, ... (irisation)** ⇒ méthode additive

Pigments minéraux



Pigments organiques

ex. : l'indigo



Fluorescence de la fluorescéine mise en évidence par une lampe UV

© Yvon RENOTTE - ICube-Stresbourg (19 juin 2015)

Les Couleurs

d'où vient la couleur ? *Interactions lumière – matière et lumière – lumière*

- **absorption** (pigments, luminescence, ...) \Rightarrow méthode soustractive
- **interférence, diffraction, diffusion, ... (irisation)** \Rightarrow méthode additive

Naturel (bio-organique)

La chlorophylle

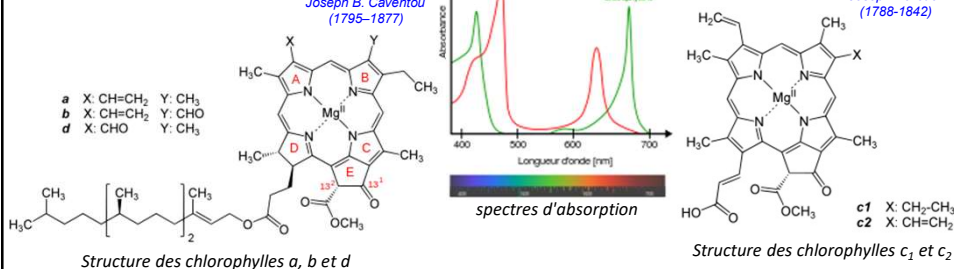


Joseph B. Caventou
(1795-1877)



Joseph Pelletier
(1788-1842)

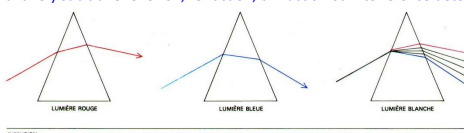
Pigment isolé en 1816 par Joseph
Bienaimé Caventou et Joseph Pelletier



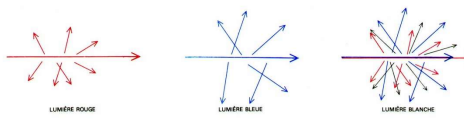
• **Interférence - Diffraction - Réfraction \Rightarrow méthode additive**

Un **photomètre** (du grec *phôtos* « lumière » et *metéoros* « dans les airs ») désigne un objet ou phénomène optique qui apparaît dans l'atmosphère terrestre quand la lumière solaire ou lunaire y subit une réflexion, réfraction, diffraction ou interférence déterminées par des circonstances particulières

Réfraction

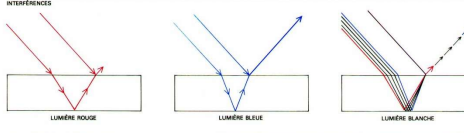


Diffusion

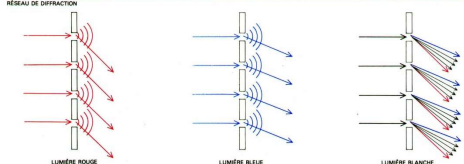


δ : angle de déviation par réfraction
 $\delta_R < \delta_G < \delta_B$
 est inversé par rapport à la déviation
 par diffraction $\theta_R > \theta_G > \theta_B$

Interférence



Diffraction



© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

• Interférence - Diffraction - Réfraction => méthode additive



éclairage à la lumière d'une bougie ou
d'une lampe à incandescence
(rayonnement riche en rouge et jaune)

Gemmes

alexandrite artificielle

impuretés présentes dans le cristal : ions chrome

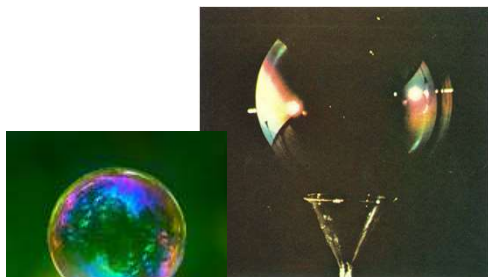
Les gemmes sont colorées par leurs
'impuretés'
(inclusions, substitutions, centres colorés, ...)
des ions métalliques

ex.: Ti^{3+} (titane: rose - rouge)
 V^{3+} et V^{4+} (vanadium: vert - bleu-vert)
 Cr^{3+} (chrome: vert ou rouge selon la structure
cristalline) et Cr^{4+} (chrome: bleu)
 Mn^{2+} (manganèse: jaune - vert) et Mn^{3+}
(manganèse: rouge profond)
 Fe^{2+} (fer: rouge) et Fe^{3+} (fer: jaune)
 Co^{2+} (cobalt: rose ou bleu selon la structure
cristalline)
 Ni^{2+} (nickel: vert)
 Cu^{2+} (cuivre: vert ou bleu selon la structure
cristalline)

lampe à fluorescence (rayonnement blanc
à bleuté)

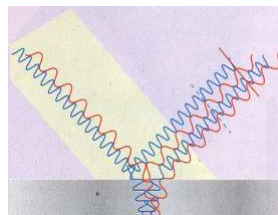
© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

• Interférence - Diffraction - Réfraction => méthode additive



Couleurs par Interférence

Bulle de savon
variations d'épaisseur
du film d'eau savonneuse → iridescence

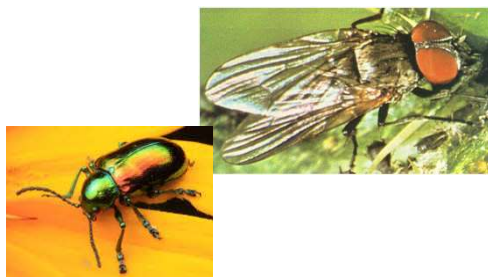


*Interférences de deux ondes de couleurs (fréquences)
différentes sur une lame mince*

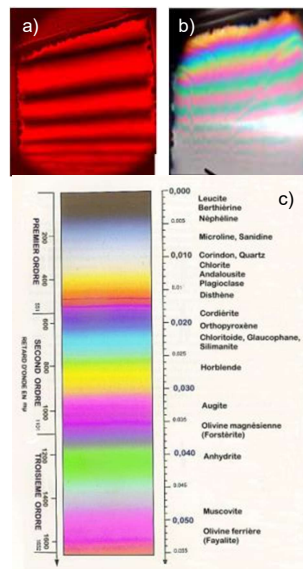
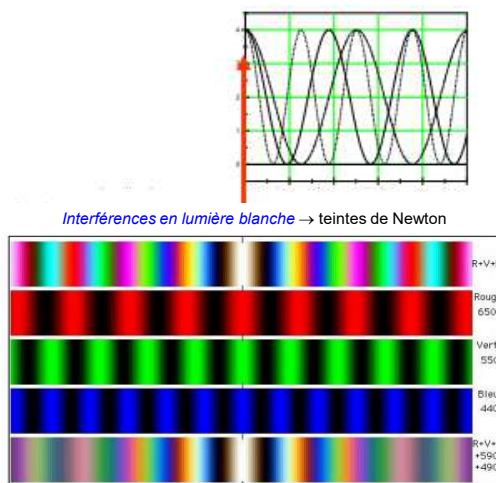
dans l'angle d'observation:
- les ondes rouges sont en phase → interférence constructive
→ on observe une couleur rouge
- les ondes bleues sont en opposition de phase → éteintes

Ailes d'insectes
taches roses et vertes

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)



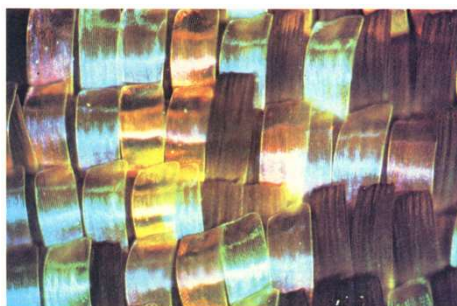
Les teintes de Newton



Interférences d'égale épaisseur : lame de savon éclairée en lumière monochromatique (a), éclairée en lumière blanche (b)
En haut: frange noire (épaisseur quasi-nulle). Ensuite succession de couleurs: jaune, orange, violet foncé, bleu, ... : teintes de Newton (c)

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

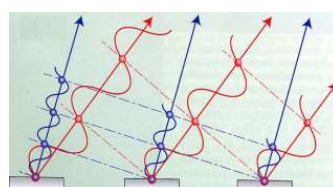
• Interférence - Diffraction - Réfraction => méthode additive



Couleurs par Diffraction - Interférence

Aile d'un papillon malgache

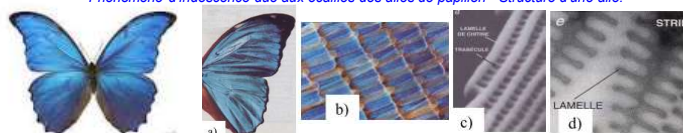
détails : empilement de lames de chitine séparées par des lames d'air
structure multicouche éclairée en lumière blanche



Réseau en réflexion

La diffraction et les interférences produites par le réseau créent de l'iridescence
Les interférences forment des franges de couleurs

Phénomène d'iridescence due aux écailles des ailes de papillon - Structure d'une aile:



a) à l'œil nu, b) au microscope (grossissement 100x), c) au microscope électronique (grossissement 1000x)
d) au microscope électronique (grossissement 5000x, vue de profil)

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

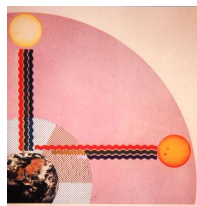
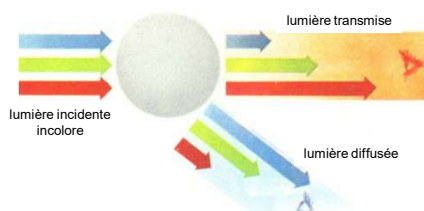
• Interférence - Diffraction - Réfraction => méthode additive

Pour
- en savoir plus
- exemples de
photomètres
cliquer →

Couleurs par Diffusion

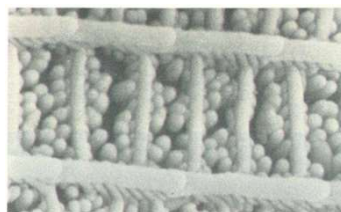
Bleu du ciel

diffusion par microparticules en suspension
dans l'air (*diffusion de Rayleigh*)

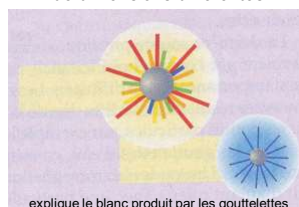


Aile d'un papillon malgache

détails au microscope électronique



diffusion de Mie par deux particules
de dimensions différentes



explique le blanc produit par les gouttelettes
d'eau qui forment les nuages

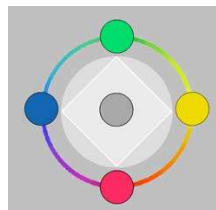
© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

D'autres études ...

Les systèmes de couleurs basés
sur les couleurs opposées
Ewald Hering (1878)

4 couleurs primaires qui produisent des
mélanges linéaires c'est-à-dire où la
luminosité reste constante

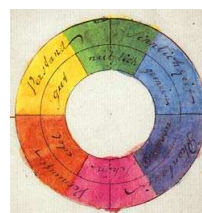
Théorie en opposition avec celle de
Young - Helmholtz



Ewald Hering (1834-1918)

Johann Wolfgang von Goethe

1790 à 1823 : "Traité des couleurs"
Théorie sur la polarité des couleurs à partir
du contraste naturel entre le clair et le
foncé (qui ne joue aucun rôle chez Newton)



Johann W. von Goethe
(1749-1832)

Johann Wolfgang von Goethe "le cercle chromatique"
Aquarelle de la propre main de Goethe. 1808.
Goethemuseum, Hochstift.

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

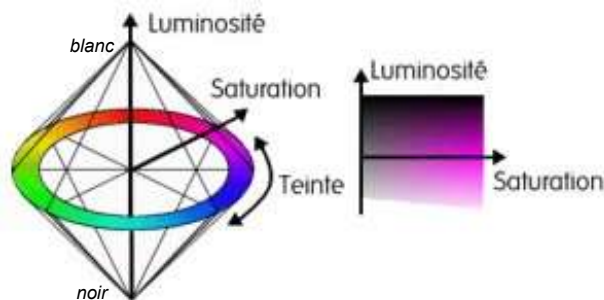
Trichromie

en ajoutant 3 couleurs que l'on appelle primaires.

Toutefois système qui se rapproche le plus de notre perception des couleurs

= modèle TSL composé :

- d'une teinte (angle sur le cercle des couleurs) : t_λ [nm]
- d'une saturation (pourcentage de blanc apporté à la teinte) : L_λ/L [%] = $\frac{L-L_W}{L}$
- d'une luminosité (intensité de la teinte) : L [lx]



représentation 3D : complexe → simplifier

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

Le système Munsell (1909)

Albert H. Munsell (1858-1918)

Le livre Munsell de la couleur

Classeurs de couleur

© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

La couleur, une question simple ?

En résumé

- La lumière blanche (et d'autres radiations) est (sont) composite(s)
- Les couleurs sont produites par *interaction lumière* (émise par les sources) – *matière et lumière - lumière*
 - quantiques, photonique → absorption, émission, luminescence, ...
 - électromagnétique, ondulatoire → réflexion, réfraction, diffraction, diffusion, interférence, ...
 - séparation des composantes chromatiques de la *lumière incidente*
 - éventuellement 'recombinaisons' des radiations ré-émises, déviées (interférences en lumière blanche: teintes de Newton)
- Les photons sont absorbés par les capteurs photosensibles de la rétine de l'œil
 - bâtonnets: nombreux, très sensibles, ne voient pas les couleurs → vision nocturne
 - cônes: sensibles aux très faibles éclaircissements, perception des couleurs → vision diurne
 - 3 types de cônes: L (sensibles au rouge), M (au vert) et S (au bleu)
 - interaction photons – composants photo-sensibles des cônes
 - réactions photo-chimiques
 - production d'impulsions électriques transmises au cerveau par le nerf optique
 - informations traitées par le cerveau (cortex)
 - **sensation de couleur**
- Comment traiter / quantifier la sensation de couleur pour la transmettre et la reproduire le plus fidèlement possible, avec toutes ses nuances (éclaircissements et teintes) alors qu'il ne s'agit pas d'une 'grandeur physique' ?
 - concepts de trichromie et d'additivité
 - codage de la 'sensation colorée'
 - **reproduction fidèle des couleurs**

© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

Pour - Détails sur les formats: cliquer →
- Terminer: cliquer →

Exemple de traitement

Capture / traitement de l'information : matrice CCD ou CMOS

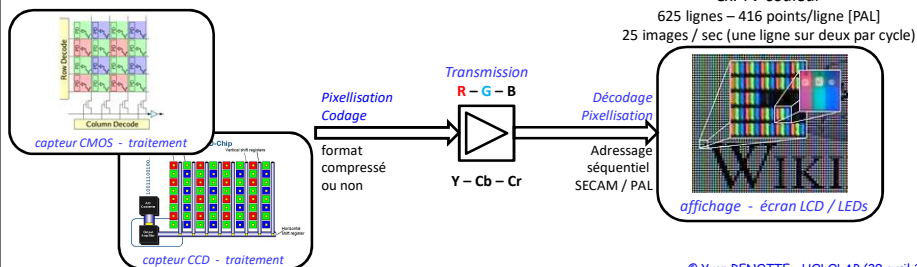
- pixellisation → collecte des informations → traitement
- signaux R – G – B
- compression
 - signaux compressés (formats *jpeg, mpeg, TIF, BITMAP, GIF, ...*)
 - ex.: *jpeg* = modèle de type chrominance / luminance Y Cb Cr
 - Y**: information de **luminance**, **C_b** et **C_r**: informations de **chrominance** (C_b = bleu – Y, C_r = rouge – Y)

Transfert

/ décompression

décodage de l'information : adressage à l'écran LCD, LEDs, ...

Affichage



© Yvon RENOTTE - HOLOLAB (29 avril 2016)

La couleur, une question simple ?

Vision – perception
Informations
- géométriques
- photo-colorimétriques

Les systèmes photoniques

Forme

Distribution

- d'éclairements
- de couleurs

L'œil

La rétine: les pixels
- les bâtonnets
- les cônes

Origine des couleurs

Influence de la source

Absorption – Émission

Pigments

Interférences

Reproduction

Trichromie

Système RGB

Paramétrisation

Diagrammes de
chrominance

Synthèses

- additive
- soustractive

Exemple(s)

Merci pour votre bonne attention

© Yvon RENOTTE – HOLOLAB (29 avril 2016)

Bibliographie sommaire

- **Manuel d'éclairage photo**, *Fil Hunter, Steven Biver & Paul Fuqua*, Groupe Eyrolles (2013 – 2^e éd.)
- **Art et Science de la Couleur**, *Georges Roque*, Éditions Gallimard – tel gallimard (2009)
- **Couleurs et Lumière**, *Chérif Zanantiri*, Éditions Ellipses – La physique pour tous (2003)
- **Vision et mesure de la couleur**, *Paul Kowaliski*, Masson et Cie (1990 – 2^e éd.)
- **La Colorimétrie: principes et applications**, *Yves Dordet*, Éditions Eyrolles (1990)
- **Vision, Photométrie, Colorimétrie: une introduction**, *Alain Pelat*, Éditions Ellipses – Imagerie & Télévision (1988)
- **The Science of Soap Films and Soap Bubbles**, *Cyril Isenberg*, Tieto Ltd – Advanced Educational Toys Ltd (1978)
- **Couleur: échelles & schémas**, *Richard Ducousset & André Lemonnier*, CCI – Éditions, Centre Georges Pompidou (1974)
- **Théorie photographique appliquée**, *Paul Kowaliski*, Masson & Cie (1972)
- **Physique générale – Photométrie – Colorimétrie**, *Robert Debot*, Édition Rodestra S.P.R.L. (1972)

Ouvrages généraux

- **Optique géométrique et ondulatoire**, *José-Philippe Pérez*, Masson et Cie (1994 – 4^e éd.)
- **Optics**, *Eugene Hecht (& Alfred Zajac)*, Addison – Wesley Publishing Co. (1987 – 2^e éd.)
- **Lumière et matière: une étrange histoire**, *Richard Feynman*, InterÉditions – Points – Sciences (1987)
- **La Lumière**, *Bernard Maitte*, InterÉditions – Points – Sciences (1981)

Monographies

- **Météores et effets lumineux dans l'atmosphère terrestre**, *Émile Biéumont*, PUF - Collection QSJ ? N° 3116 (1997)
- **La Lumière**, *Émile Biéumont*, Presses Universitaires de France - Collection QSJ ? N° 48 (1996 – nouvelle éd.)
- **Développement et tirage Couleur**, *Gérard Betton*, PUF - Collection QSJ ? N° 1716 (1985 – 2^e éd.)
- **La Photométrie**, *Jean Terrien & François Desvignes*, PUF - Collection QSJ ? N° 1467 (1972)
- **La reproduction des couleurs**, *Jean Dourgnon & Paul Kowaliski*, PUF - Collection QSJ ? N° 472 (1966 – 2^e éd.)
- **La Couleur**, *Maurice Dérivé*, PUF - Collection QSJ ? N° 220 (1985 – 5^e éd.)
- **La Lumière**, *Pierre Rousseau*, PUF - Collection QSJ ? N° 48 (1971 – 8^e éd. refondue)

Articles

- **La vision des couleurs**, La Recherche, n°272 (1995)
- **Couleurs de la Nature**, Revue du Palais de la Découverte, numéro spécial 44 (1994)
- **Les couleurs de l'invisible**, Revue du Palais de la Découverte, Vol.17, n°165 (1989)
- **La couleur**, La Recherche, n°118 (1981)
- **L'origine de la couleur**, Pour la Science, n°38 (1980)

Pour - Lire les annexes: cliquer →
- Terminer: cliquer →

© Yvon RENOTTE – U3A (21 janvier 2018)

ANNEXE III – p.1 de 12

Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spectrale Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...



Willebrord Snell
(1580–1626)



René Descartes
(1596–1650)

Réfraction de Snell - Descartes

$$\sin i = n \sin r$$

$$n = n_2/n_1$$

$i \div n$ et $n(\lambda) \div 1 + (1/\lambda^2) + \dots + (1/\lambda^{2n}) + \dots$ (en 1^{re} approximation)

$$r \div i / 1 + \dots + (1/\lambda^{2n}) + \dots \rightarrow r_B < r_G < r_R \text{ pour } i = \text{cte}$$

Formules d'Abbe, de Cauchy, de Sellmeier, ...



Ernst K. Abbe
(1840-1905)



Augustin L. Cauchy
(1789-1857)

Wilhelm Sellmeier
(1859-1928)

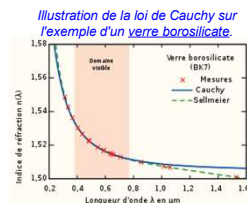
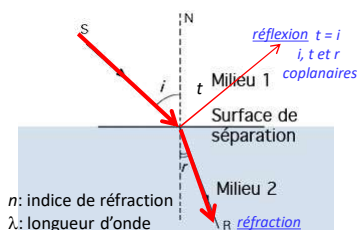
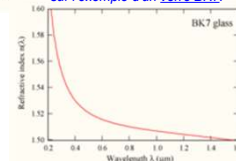


Illustration de la loi de Sellmeier
sur l'exemple d'un verre BK7.



© Yvon RENOTTE – U3A (22 janvier 2018)

ANNEXE III – p.2 de 12

Quelques valeurs de l'indice de réfraction

	IR		n_C	n_D	n_F	n_G	UV
ν (THz) (10^{12} Hz)	150	250	456,8	508,7	616,7	691	830,4
λ (nm) (10^{-9} m) dans le vide	1998,6	1199,2	656,29 Rouge H_2	589,33 Jaune Na	486,12 Bleu H_2	433,85	361,02
Verre crown	1,497	1,505	1,514	1,517	1,523	1,528	1,539
Verre flint léger	1,549	1,559	1,571	1,575	1,585	1,594	1,614
Verre flint très dense	1,832	1,848	1,879	1,890	1,919	1,945	
Sel gemme (NaCl)			1,541	1,544	1,553	1,561	
Diamant			2,410	2,417	2,435		
Métacrylate de méthyle			1,490	1,493	1,499		
Eau 20°C 100°C			1,331 1,333 1,318		1,337	1,340	
Air 0°C P atm normale			1,000276	1,000277	1,000279		

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

© Yvon RENOTTE – U3A (23 janvier 2018)

ANNEXE III – p.3 de 12

Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spectrale Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...



Willebrord Snell
(1580–1626)



René Descartes
(1596–1650)



Christiaan Huygens
(1629–1695)



Augustin Fresnel
(1788–1827)



James C. Maxwell
(1831–1879)

Réfraction de Snell - Descartes

$$\sin i = n \sin r$$

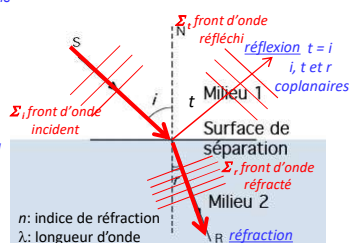
$$n = n_2/n_1$$

Approche ondulatoire de Huygens – Fresnel – Maxwell

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad n = c/v = \lambda_0/\lambda \quad \lambda_0 = cT \quad \lambda = vT \quad T = 1/\nu = 2\pi/\omega$$

c : vitesse de la lumière dans le vide
 v : vitesse de la lumière dans le milieu
 λ_0 : longueur d'onde dans le vide

$c \approx 300\,000\,000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
 T : période
 ν : fréquence
 ω : pulsation



$$E_1 = E_0 \sin(\omega t + \varphi_1) = E_0 \sin\left(\frac{2\pi c}{\lambda_1 n_1} t + \varphi_1\right)$$

$$E_2 = \varepsilon E_0 \sin(\omega t + \varphi_2) = \varepsilon E_0 \sin\left(\frac{2\pi c}{\lambda_2 n_2} t + \varphi_2\right) \quad \varepsilon \leq 1$$

$$n_2 > n_1 \rightarrow v_2 < v_1 \rightarrow \lambda_2 < \lambda_1$$

© Yvon RENOTTE - U3A (22 janvier 2018)

ANNEXE III – p.4 de 12

Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spectrale Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...



Willebrord Snell
(1580–1626)



René Descartes
(1596–1650)



Christiaan Huygens
(1629–1695)



Augustin Fresnel
(1788–1827)

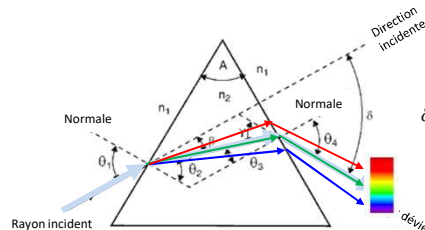


James C. Maxwell
(1831–1879)

Double réfraction : cas du prisme

$$\sin i = n \sin r$$

$$n = n_2/n_1$$

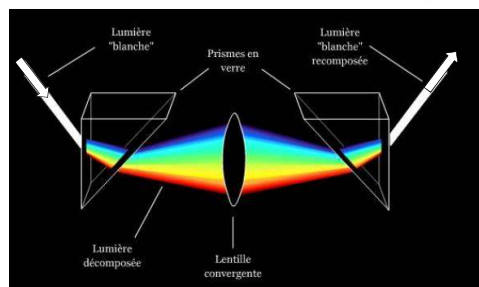


δ : angle de déviation
 δ_{min} : déviation minimale

$$\delta_{min} = 2 \arcsin\left(n \sin\left(\frac{A}{2}\right)\right) - A$$

$$n = \sin\left(\frac{A + \delta_{min}}{2}\right) / \sin\left(\frac{A}{2}\right)$$

$$\delta_R < \delta_G < \delta_B$$



Doublet de prismes
→ décomposition de la lumière blanche
→ recombinaison de la lumière blanche

© Yvon RENOTTE - U3A (22 janvier 2018)

ANNEXE III – p.5 de 12

Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spectrale Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...



Willebrord Snell
(1580–1626)



René Descartes
(1596–1650)



Christiaan Huygens
(1629–95)



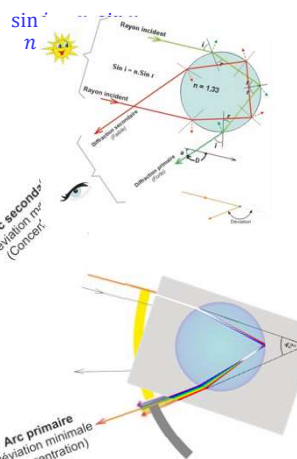
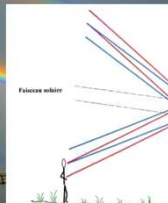
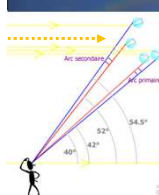
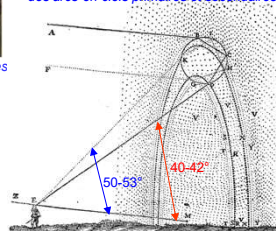
Augustin Fresnel
(1788–1827)



James C. Maxwell
(1831–79)

Arcs-en-ciel simple et double

Schéma de René Descartes sur la formation des arcs-en-ciels primaires et secondaires



© Yvon RENOTTE - U3A (24 janvier 2018)

ANNEXE III – p.6 de 12

Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spectrale Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...



Christiaan Huygens
(1629–95)



Augustin Fresnel
(1788–1827)

Diffraction de Huygens – Fresnel

Diffraction scalaire : formules de Fraunhofer - Kirchhoff

$$\theta \div \lambda/d \rightarrow \theta_R > \theta_G > \theta_B \text{ pour } i \text{ \& } d \text{ (ouverture diffractante) = ctes}$$

Fente (largeur d)

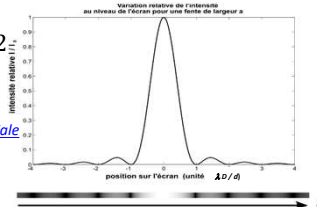


$$I \div (\sin u/u)^2$$

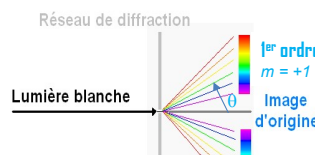
$$u = \frac{\pi d}{\lambda D} x$$

pseudo-période spatiale
à la distance D

$$A = \frac{\lambda D}{d}$$



Réseau



$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d}$$

d : pas du réseau



Joseph von Fraunhofer
(1787–1826)



Gustav Kirchhoff
(1824–87)

© Yvon RENOTTE - U3A (23 janvier 2018)

ANNEXE III – p.7 de 12

Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spectrale
Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...

Interférences en lumière blanche

En lumière blanche, on peut considérer que chacune des longueurs d'onde du spectre visible forme un système de franges et que ces systèmes se superposent ce qui s'interprète en considérant que chaque photon lumineux de la bande spectrale de la source produit son propre système de franges

2 photons de longueur d'onde distincte sont incohérents entre eux: leur différence de phase est aléatoire dans le temps

Pour une suite discrète de longueur d'onde λ_i l'intensité est donnée par

$$I = \left\langle \sum_j |A_j e^{i\omega_j t} \sum_i [e^{-i\varphi_{ij}(P,t)}]|^2 \right\rangle = \sum_j I_j \left[1 + \cos \frac{2\pi\delta(P)}{\lambda_j} \right] \rightarrow I \div \cos^2 \frac{\pi\delta}{\lambda}$$

- si la **différence de marche $\delta < \text{la longueur de cohérence}$** de la source: **le champ apparaît sous forme de franges colorées**

- si **$\delta (= 2ne / e$: chemin géométrique) augmente** les **teintes palissent**: on dit qu'elles sont délavées de blanc

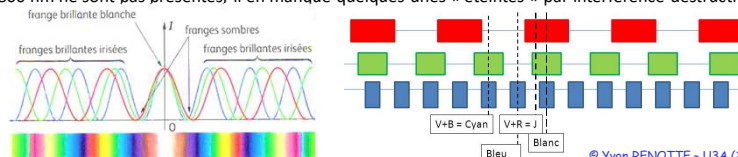
- si **$\delta > \text{à la longueur de cohérence}$** : **le champ apparaît uniformément blanc**: c'est le **blanc d'ordre supérieur**

les franges ont disparu : la modulation en cosinus a été réduite par l'effet de la cohérence temporelle de la source

ex.: pour une source blanche où $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$ et $\Delta\lambda = 400 \text{ nm}$ la longueur de cohérence est $l_c = \lambda^2 / \Delta\lambda = 0,9 \mu\text{m}$

→ si **$\delta \geq 1 \mu\text{m}$** : les franges disparaissent

Si on analyse le blanc d'ordre supérieur au spectroscopie, on constate que toutes les longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 800 nm ne sont pas présentes, il en manque quelques unes « éteintes » par interférence destructive



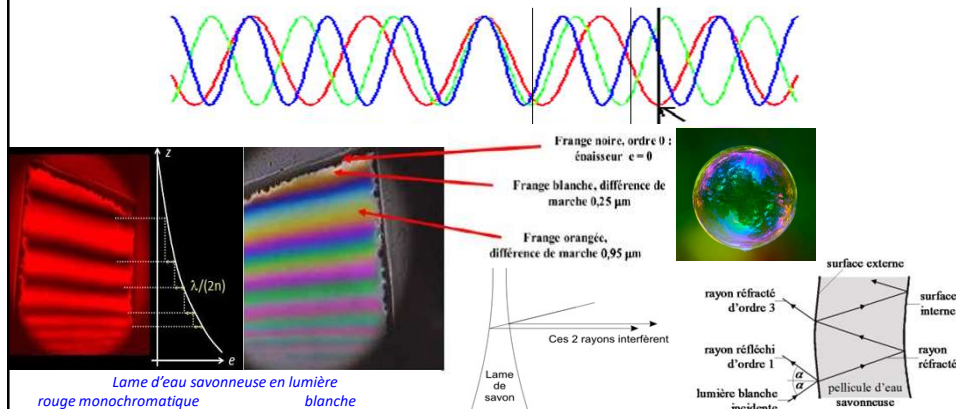
© Yvon RENOTTE - U3A (24 janvier 2018)

ANNEXE III – p.8 de 12

Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spectrale
Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...

Interférences en lumière blanche

En lumière blanche, on peut considérer que chacune des longueurs d'onde du spectre visible forme un système de franges et que ces systèmes se superposent ce qui s'interprète en considérant que chaque photon lumineux de la bande spectrale de la source produit son propre système de franges



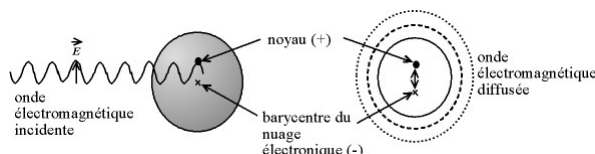
© Yvon RENOTTE - U3A (24 janvier 2018)

ANNEXE III – p.9 de 12

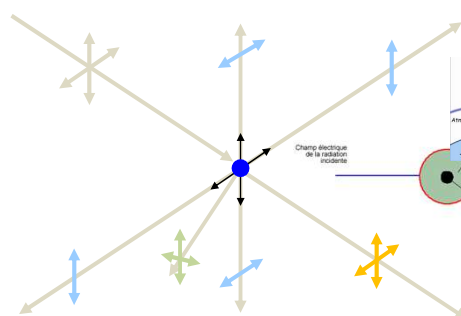
Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spatiale Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...



Lord John W.S. Rayleigh
(1842–1919)
Prix Nobel de Physique 1904



Diffusion de Rayleigh : l'atome, excité par l'onde électromagnétique de $\lambda >$ taille de la particule, réémet une onde



- La lumière
- transmise est naturelle à dominante jaune - rougeâtre
 - diffusée est **polarisée** totalement ou partiellement à dominante bleue

- le fond du ciel est bleu
- le soleil (qui émet de la lumière blanche) est jaune en journée, rougeâtre au lever et au coucher en raison de l'épaisseur des couches atmosphériques traversées

Puissance moyenne diffusée par le dipôle oscillant
 p_0 : moment dipolaire

$$\langle P \rangle = \frac{\mu_0}{12\pi c} \omega^4 p_0^2$$

$$\omega_{bleu} = 2 \omega_{rouge}$$

$$\rightarrow \langle P_{bleu} \rangle = 2^4 \langle P_{rouge} \rangle = 16 \langle P_{rouge} \rangle$$

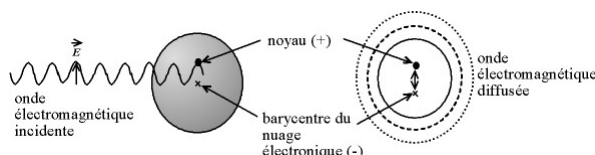
© Yvon RENOTTE - U3A (23 janvier 2018)

ANNEXE III – p.10 de 12

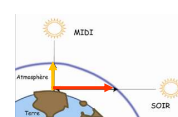
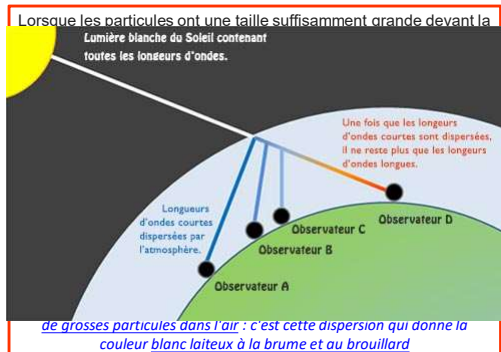
Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spatiale Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...



Lord John W.S. Rayleigh
(1842–1919)
Prix Nobel de Physique 1904



Diffusion de Rayleigh : l'atome, excité par l'onde électromagnétique de $\lambda >$ taille de la particule, réémet une onde



Puissance moyenne diffusée par le dipôle oscillant
 p_0 : moment dipolaire

$$\langle P \rangle = \frac{\mu_0}{12\pi c} \omega^4 p_0^2$$

$$\omega_{bleu} = 2 \omega_{rouge}$$

$$\rightarrow \langle P_{bleu} \rangle = 2^4 \langle P_{rouge} \rangle = 16 \langle P_{rouge} \rangle$$



Gustav Mie
(1868-1957)

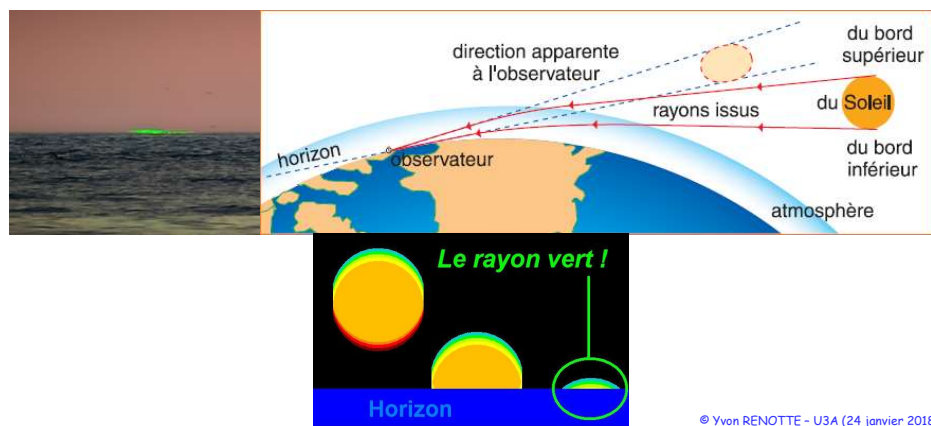
© Yvon RENOTTE - U3A (23 janvier 2018)

ANNEXE III – p.11 de 12

Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spectrale
Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...

Le rayon vert

Photométéore rare qui peut être observé **au lever ou au coucher du Soleil** et qui prend la forme d'un point vert visible pendant quelques secondes au sommet de l'image de l'astre tandis qu'il se trouve en grande partie sous l'horizon
Un même phénomène peut également être observé avec la Lune



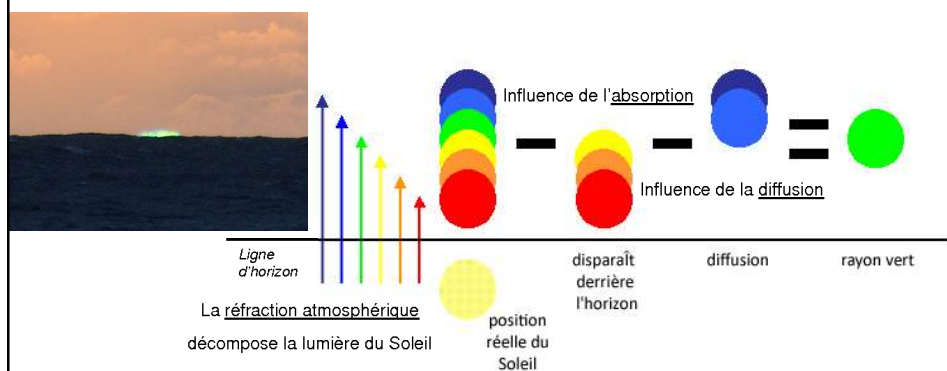
ANNEXE III – p.12 de 12

Pour - Poursuivre la présentation: cliquer ➡
 - Terminer: cliquer ➡

Phénomènes de propagation de la lumière accompagnés de dispersion spectrale
Réfraction, Diffraction, Dispersion, ...

Le rayon vert

Photométéore rare qui peut être observé **au lever ou au coucher du Soleil** et qui prend la forme d'un point vert visible pendant quelques secondes au sommet de l'image de l'astre tandis qu'il se trouve en grande partie sous l'horizon
Un même phénomène peut également être observé avec la Lune



Colorimétrie / Lois de Grassmann / Trichromie

- 1) Deux radiations chromatiquement équivalentes à une troisième sont chromatiquement équivalentes entre elles
- 2) Quand plusieurs radiations agissent simultanément sur l'œil, on peut en remplacer une ou plusieurs par des radiations chromatiquement équivalentes
- 3) Si deux plages lumineuses donnent la même sensation colorée, l'égalité subsiste si l'on change dans un même rapport la luminosité des deux plages sans changer la teinte et la saturation

Lois de Grassmann

- additivité : $A = B \rightarrow A + C = B + C$
- multiplicité de la luminance : $A = B \rightarrow kA = kB$
- associativité : $A + B + C$ et $A = D + E$
 $\rightarrow (D + E) + B = C$ et $D + E + B + F = C + F$ etc ...
- transitivité : $A + B = C$ et $D + E = C \rightarrow A + B = D + E$

Thomas Young
(1773-1829)James Clerk Maxwell
(1831-1879)Hermann G. Grassmann
(1809-1877)

Trichromie : 3 couleurs primaires (luminances): par ex. : Rouge – Vert – Bleu

Toute sensation colorée peut s'obtenir au moyen des lumières provenant de 3 sources S_1 , S_2 et S_3 de couleurs bien choisies (le mélange de 2 ne peut pas donner la 3^e): ce sont les **sources primaires**

→ **en théorie**: recherche de 3 couleurs 'étalons' arbitraires

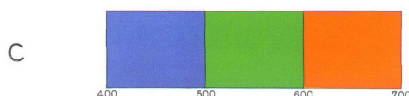
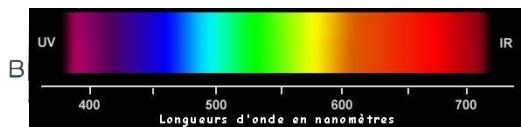
en pratique: on recouvre un domaine d'autant plus grand que les 3 couleurs diffèrent

Young (1801-07), Maxwell (1857), Grassmann (1853), Helmholtz (1861), ...

- => rouge très saturé vers 700 nm
- bleu-violet très saturé vers 400 nm
- vert très saturé au milieu du spectre

Hermann L.F.
von Helmholtz
(1821-94)

© Yvon RENOTTE – U3A (26 janvier 2018)



Pour - Poursuivre la présentation: cliquer →
 - Terminer: cliquer →

NEWTON

Décomposition de la lumière blanche

Isaac Newton
(1642-1727)

spectre

trichromie

Interactions Lumière - Matière : Rappels

Quelques notions utiles de ...

pour mieux comprendre et appréhender
ces interactions

ANNEXE II – p.1 de 6

© Yvon RENOTTE – U3A (28 janvier 2018)

ANNEXE II – p.2 de 6

"... spectro-photométrie"

- matériau transparent : absorption - diffusion spectrales

$$I_t = I_i \cdot \exp(-\mu d)$$

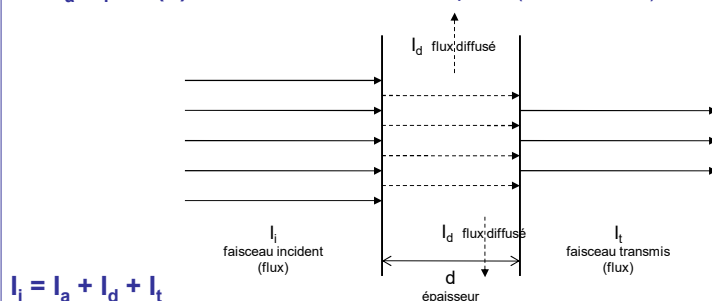
μ est le coefficient d'absorption
(il est caractéristique du matériau traverse)

$$T = I_t / I_i = T(\lambda)$$

facteur de transmission (transmittance)

$$\alpha = I_a / I_i = \alpha(\lambda)$$

facteur d'absorption (absorbance)



© Yvon RENOTTE – U3A (28 janvier 2018)

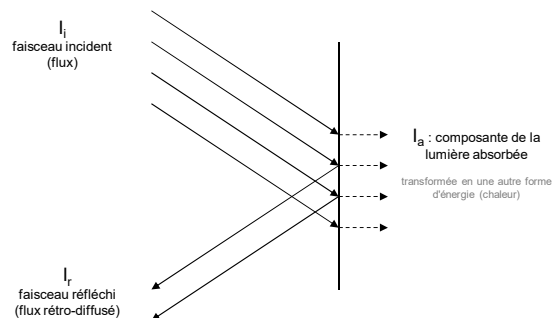
"... spectro-photométrie"

• matériau réfléchissant (rétro-diffusant) / absorbant

$$R = I_r / I_i = R(\lambda)$$

$$I_a = I_i - I_r \quad (I_t = 0)$$

facteur de réflexion (réflectance), il varie en fonction de λ

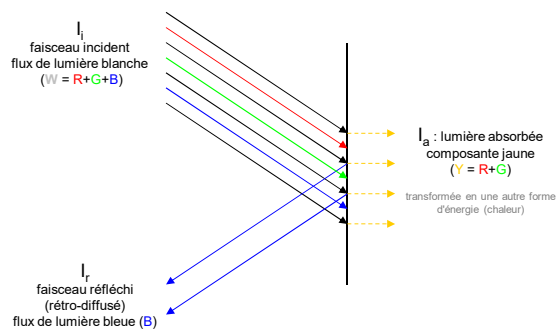


© Yvon RENOTTE - U3A (28 janvier 2018)

"... colorimétrie"

• matériau réfléchissant (rétro-diffusant) / absorbant

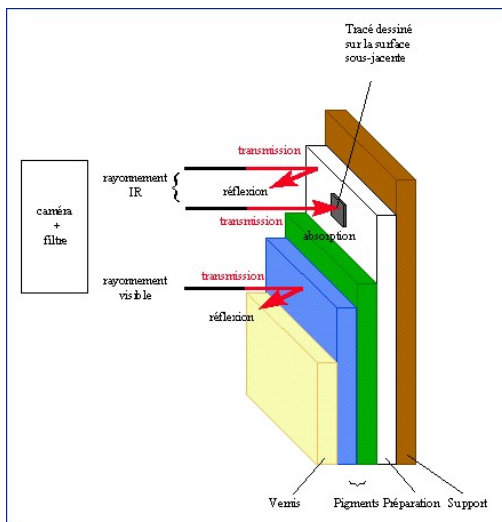
- La lumière blanche **W** peut être "construite" en superposant trois radiations correctement dosées: une rouge **R**, une bleue **B** et une verte **G**
- La superposition du rouge et du vert donne du jaune **Y** - couleur complémentaire du bleu



© Yvon RENOTTE - U3A (28 janvier 2018)

ANNEXE II – p.5^{de 6}

Principe de lecture d'une peinture, d'une impression, d'une photographie couleur 'papier'



Représentation schématique du principe de lecture des tableaux

Sous les couches pigmentaires d'une peinture de chevalet, on trouve, en général, une couche de préparation sur laquelle est tracé le dessin sous-jacent. Les couches de pigments absorbent ou diffusent la radiation infrarouge d'une manière différente de la lumière visible (cf. Figure)

On notera que la lumière traverse 2 fois les couches de pigments: une en venant de la source, l'autre au retour après réflexion sur le substrat

Il en est de même pour les imprimés : il s'agit dans ce cas de couches d'encres colorées

Pour les photographies – papier en couleurs, les *filtres chromatiques* sont des couches de gélatine teintées

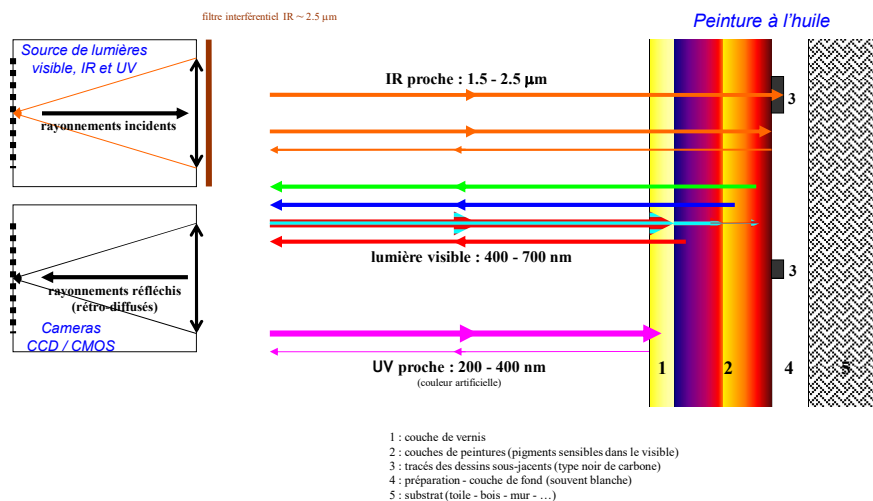
On note que ce type de lecture appartient typiquement au processus de **synthèse soustractive** (cf. détails séparément)

© Yvon RENOTTE – U3A (28 janvier 2018)

ANNEXE II – p.6^{de 6}

Principe (détails)

Pour - Poursuivre la présentation cliquer ➡
- Terminer: cliquer ➡



Les tracés des rayonnements UV et IR sont arbitrairement représentés par des traits respectivement mauves et bruns / orangés

© Yvon RENOTTE – U3A (28 janvier 2018)

Exemples de formats de compression des couleurs

- **BMP** (*Bitmap*): Image matricielle non compressée, haute qualité mais fichier très lourd, ouvert, développé par Microsoft et IBM. Un des formats d'images les plus simples à développer et à utiliser pour programmer. Il est lisible par quasiment tous les visualiseurs et éditeurs d'images.
- **GIF** (*Graphics Interchange Format*): Image supportant jusqu'à 256 couleurs maximum, supporte les animations.
- **JPG** (*Joint Photographic Experts Group*): Image fortement compressée mais avec des pertes en qualité. La version 2000 peut être compressée sans perte.
- **PNG** (*Portable Network Graphics*): Image 'moyennement' compressée mais sans pertes. Utile pour compresser des images 'simples' contrairement au JPG qui lui peut compresser des images complexes avec beaucoup de détails.
- **TIFF** (*Tagged Image File Format*): Format de fichier pour image numérique. Adobe en est le dépositaire et le propriétaire.
- **MPEG** (*Moving Picture Experts Group*): Groupe de travail du comité technique mixte de l'ISO et de la CEI pour les technologies de l'information. Ce groupe d'experts est chargé du développement de normes internationales pour la compression, la décompression, le traitement et le codage de la vidéo, de l'audio et de leur combinaison, de façon à satisfaire une large gamme d'applications
- **Rouge, vert, bleu : RVB ou RGB** : Le plus simple des systèmes de codage informatique des couleurs. Les écrans d'ordinateurs reconstituent une couleur par synthèse additive à partir de trois couleurs primaires, un rouge, un vert et un bleu, formant sur l'écran une mosaïque trop petite pour être aperçue. Le codage RVB indique l'intensité pour chacune de ces couleurs primaires.



lumières rouge, vert et bleu d'un écran: très grossies

© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

Exemples de formats de compression des couleurs

Codage jpeg

Y : signal de luminance : noir et blanc = 'rouge + vert + bleu'

C_b et C_r : signaux de chrominance

C_b : 'bleu - Y' / C_r : 'rouge - Y'

R, G et B : codés de 0 à 255

$$Y = 0,299 R + 0,587 G + 0,114 B$$

$$C_b = - 0,1687 R - 0,3313 G + 0,5 B + 128$$

$$C_r = 0,5 R - 0,4187 G - 0,0813 B + 128$$

R	V	B	Couleur
0	0	0	noir
0	0	1	nuance de noir
255	0	0	rouge
0	255	0	vert
0	0	255	bleu
128	128	128	gris
255	255	255	blanc

© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

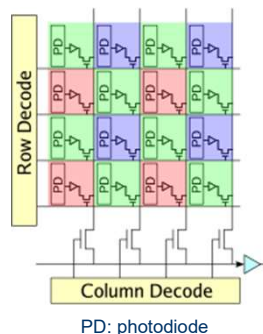
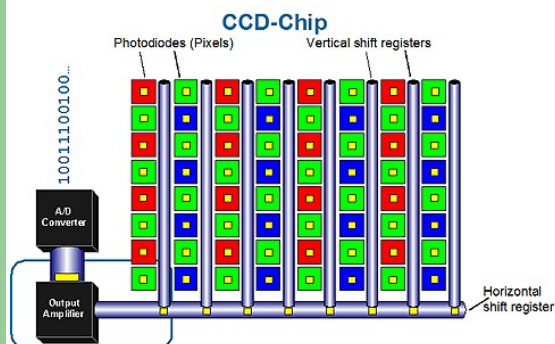
Capteurs photosensibles

ANNEXE IV – p.3 de 3

Pour - Poursuivre la présentation: cliquer ➡
- Terminer: cliquer ➡

Capteur CCD (Charge-Coupled Device)

Capteur CMOS (Complementary metal oxide semi-conductor)



© Yvon RENOTTE - ICube-Strasbourg (19 juin 2015)

La couleur : perception et reproduction

Merci pour votre bonne
attention

© Yvon RENOTTE - U3A (28 janvier 2018)